



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**SILOVÉ ZATÍŽENÍ FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ PŘI  
OBRÁBĚNÍ**

FORCE LOADING OF MILLING TOOLS DURING THE MACHINING PROCESS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Luděk Procházka**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Aleš Polzer, Ph.D.**

**BRNO 2018**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Luděk Procházka**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Polzer, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Silové zatížení frézovacích nástrojů při obrábění

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průběhu třískového obrábění je možno měřit aktuální hodnoty silového zatížení řezného nástroje/obrobku. Znalost velikosti silové výslednice i jejího směru pak umožňuje lépe rozhodovat o způsobu programování dané technologie a o vhodnosti aplikace různých obráběcích strategií.

Téma diplomové práce je detailněji zaměřeno na analýzu silového zatížení monolitních frézovacích nástrojů průměru 12 mm z produkce Seco Jabro. Tyto nástroje jsou vhodné pro frézování tenkostěnných součástek do leteckého průmyslu.

### Cíle diplomové práce:

- Stručný rozbor možností měření sil při třískovém obrábění.
- Návrh experimentálního měření silového zatížení řezného nástroje/obrobku.
- Praktické měření silového zatížení při frézovacích operacích.
- Vyhodnocení silového záznamu s doporučením pro případnou změnu strategie obrábění.

### Seznam doporučené literatury:

GRZESIK, Wit. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. 2nd edition. Boston: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-444-63711-6.

KERSTING, Petra a Dirk BIERMANN. Modeling techniques for simulating workpiece deflections in NC milling. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2014, 7(1), 48-54. DOI:

10.1016/j.cirpj.2013.08.002. ISSN 17555817. Dostupné také z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755581713000588>

DAVIM, J. Paulo (ed.). Traditional machining processes. 1. New York: Springer, 2014. ISBN 978-366-2450-871.

DAVIM, J. Paulo (ed.). Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.

TSCHÄTSCH, Heinz. Applied machining technology. Dordrecht: Springer, 2009. 398 p. ISBN 978-3-642-01006-4.

SHAW, Milton Clayton. Metal cutting principles. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005. 651 p. ISBN 01-951-4206-3.

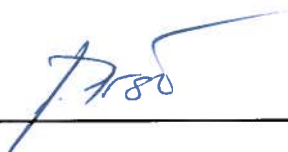
QUESADA, Robert. Computer numerical control: machining and turning centers. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005. 548 p. ISBN 01-304-8867-4.

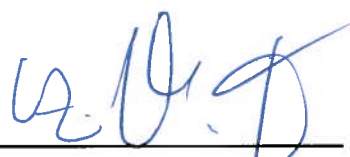
Technická příručka obrábění: soustružení - frézování - vrtání - vyvrtávání - upínání nástrojů. 2005. 10. AB Sandvik Coromant. Švédsko: Elanders, 2005.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 27. 10. 2017



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Práce se věnuje problematice silového zatížení při obrábění tenkostěnných součástí. V teoretické části je rozebráno silové zatížení působící při frézování a možnosti měření silového zatížení při frézování. Dále se práce zaměřuje na obrábění tenkostěnných součástí, problémy při obrábění těchto součástí a možnosti eliminace těchto problémů. Praktická část se zabývá návrhem a realizací měření silového zatížení na vybraných součástech. V práci je také uvedeno porovnání modelu simulace vychýlení tenkostěnných součástí s hodnotami naměřenými při reálném obrábění.

### Klíčová slova

Silové zatížení, tenkostěnné součásti, měření silového zatížení, vychýlení součástí

## ABSTRACT

The thesis deals with the problem of force loading during machining of thin-walled parts. In the theoretical part, the force load applied during milling and the possibility of measuring of the force loading during milling is analyzed. Further the work focuses on the machining of thin-walled parts, problems in machining of these parts and the possibility of eliminating these issues. The practical part deals with the design and realization of the measurement of the force load on the selected components. The thesis also presents a comparison of the simulation model of deflection of thin-walled parts with the values measured in real machining.

### Key words

Force loading, thin-walled parts, force measuring, deflections

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PROCHÁZKA, Luděk. *Silové zatížení frézovacích nástrojů při obrábění*. Brno, 2018, 62 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

### PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Silové zatížení frézovacích nástrojů při obrábění** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Bc. Luděk Procházka

**PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

## OBSAH

ABSTRAKT .....	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ .....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD .....	8
1 ROZBOR MOŽNOSTÍ MĚŘENÍ SIL PŘI TŘÍSKOVÉM OBRÁBĚNÍ .....	9
1.1 Síly při frézování .....	9
1.1.1 Měrná řezná síla.....	9
1.1.2 Průřez třísky při čelním frézování .....	10
1.1.1 Průřez třísky a síla při válcovém frézování.....	11
1.2 Měření silového zatížení .....	12
1.2.1 Nepřímé metody .....	12
1.2.2 Přímé metody .....	13
1.2.3 Piezoelektrický dynamometr .....	16
1.2.4 Sestava pro měření silového zatížení .....	19
1.4 Tenkostěnné součásti .....	20
1.4.1 Malý poměr výšky k tloušťce .....	20
1.4.2 Střední poměr výšky k tloušťce .....	21
1.4.3 Velmi vysoký poměr výšky k tloušťce .....	22
1.4.4 Obrábění součásti s tenkostěnným dnem.....	22
1.5 Problémy při obrábění tenkostěnných součástí.....	23
1.5.1 Deformace nástroje .....	25
1.5.2 Deformace obráběné součásti .....	26
1.5.3 Vibrační přerozdělení .....	29
1.5.4 Možnosti eliminace nepřesností.....	30
2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ .....	32
2.1 Obráběcí nástroj .....	32
2.1.1 Seco Jabro JS413120D3SZ3.0.....	32
2.1.2 Další nástroje .....	32
2.2 Obráběné součásti .....	33
2.2.1 Materiál.....	33
2.2.2 Tvar součásti .....	35
2.3 Obráběcí stroj.....	37
2.4 Měřicí zařízení .....	38

2.5 Řezné podmínky a technologie frézování.....	39
3 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ SILOVÉHO ZATÍŽENÍ .....	41
3.1 Experimentální měření – 1. část .....	41
3.2 Experimentální měření – 2. část .....	41
4 VYHODNOCENÍ SILOVÉHO ZÁZNAMU .....	43
4.1 Vyhodnocení 1. části experimentu.....	43
4.2 Vyhodnocení 2. části experimentu.....	46
4.2.1 Vyhodnocení silového zatížení .....	46
4.2.2 Vyhodnocení vychýlení součásti .....	47
ZÁVĚR .....	54
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	55
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	59
SEZNAM PŘÍLOH.....	62



## ÚVOD

Silové zatížení působící při třískovém obrábění nezanedbatelně ovlivňuje řezný proces. Velikost i směr jednotlivých složek silového zatížení se značně mění v závislosti na celé řadě faktorů. U tenkostěnných součástí působí toto zatížení značné problémy. Tenkostěnné součásti se hojně využívají například v leteckém a automobilovém průmyslu a jsou charakteristické velkým rozdílem hmotnosti polotovaru a konečné vyrobené součásti. U takových součástí je kladen velký důraz na přesnost rozměrů a dodržení geometrických tolerancí. Vlivem sil působících při obrábění však dochází k vychýlení součásti, které následně způsobuje rozměrové odchylky obrobené součásti. Dochází k vibracím, které jsou příčinou nepříjemného akustického projevu a zhoršené kvality obrobeného povrchu. Znalosti průběhu silového zatížení, silové výslednice a jednotlivých složek působícího silového zatížení může výrazně pomoci k lepším výsledkům při obrábění takto náročných dílů. Tato práce se věnuje teoretickému rozboru silového zatížení působícího při frézování, dále možnostem měření silového zatížení a problematice obrábění tenkostěnných součástí. V praktické části je provedeno měření silového zatížení a z něj vyplývajícího vychýlení tenkostěnné součásti. Experiment porovnává různé úpravy tenkostěnné součásti, působící silové zatížení a vznikající vychýlení. Prakticky naměřené hodnoty jsou srovnány se simulací v prostředí programu Autodesk Inventor.

## 1 ROZBOR MOŽNOSTÍ MĚŘENÍ SIL PŘI TŘÍSKOVÉM OBRÁBĚNÍ

Každý řezný proces je provázen působením řezných sil. Řezné síly zásadně ovlivňují řezný proces. Je důležité uvědomit si, že velikost i směr řezných sil se značně mění v závislosti na celé řadě faktorů. Jsou to zejména: způsob obrábění (kinematika), poloha nástroje, materiál obrobku, tloušťka třísky, opotřebení nástroje, řezné podmínky, geometrie nástroje a další. Řezné síly vznikají na břitu vlivem odebírání materiálu obrobku. Znalost velikosti, směru a průběhu řezných sil výrazně napomáhá k zajištění úspěšného obráběcího procesu, nastavení potřebného příkonu stroje i zajištění potřebných sil k upnutí obrobku [1].

### 1.1 Síly při frézování

Celkovou výslednou řeznou sílu je možné rozdělit v různě orientovaných kartézských systémech do tří složek [2]. Výsledná síla je pak vždy dána vektorovým součtem těchto tří složek. Podle normy ČSN ISO 3002 je možné výslednou sílu vyjádřit v několika různě orientovaných pravoúhlých souřadnicových systémech, jako např. [3]:

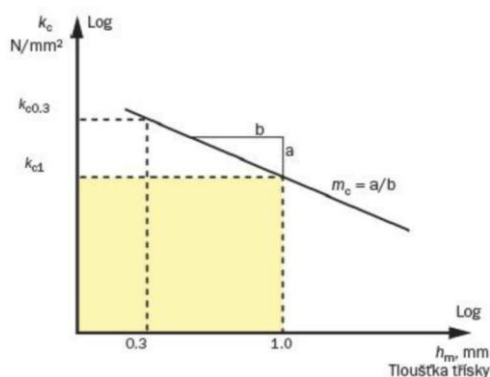
- rozklad síly ve směrech souřadného systému stroje  $F_{Xm}, F_{Ym}, F_{Zm}$ ,
- rozklad síly ve směrech charakteristických směrů obrobku  $F_{Xw}, F_{Yw}, F_{Zw}$ ,
- rozklad síly ve směrech různých pohybů  $F_c, F_{cN}, F_p$ .

#### 1.1.1 Měrná řezná síla

Měrná řezná síla je charakteristika, která udává hodnotu obrobitelnosti určitého materiálu při použití určité geometrie břitu a tloušťky třísky. Je to měrná síla, potřebná k překonání soudržnosti materiálu účinkem řezného procesu. Lze ji definovat jako sílu ve směru hlavního řezného pohybu, vztaženou na průřez třísky  $1 \text{ mm}^2$ . V základním tvaru je definována rovnicí [1,4]:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (1.1)$$

Hodnotu velikosti měrné řezné síly ovlivňuje řada faktorů. Mezi ně patří fyzikální vlastnosti materiálu, efektivní úhel čela, střední tloušťka třísky, řezné prostředí a další [4]. Poměr mezi měrnou řeznou silou a tloušťkou třísky je rozhodujícím ukazatelem pro úspěšné obrábění. Měrná řezná síla klesá s narůstající tloušťkou třísky. Příliš tenká tříška má za následek vysoké hodnoty měrné řezné síly [1]. Závislost velikosti měrné řezné síly je zobrazena na obrázku 1.1.



Obr. 1.1 Závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky [5].

Podle [5] je velikost měrné řezné síly vyjádřena vztahem:

$$k_c = k_{c1} \cdot h_m^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right), \quad (1.2)$$

kde:

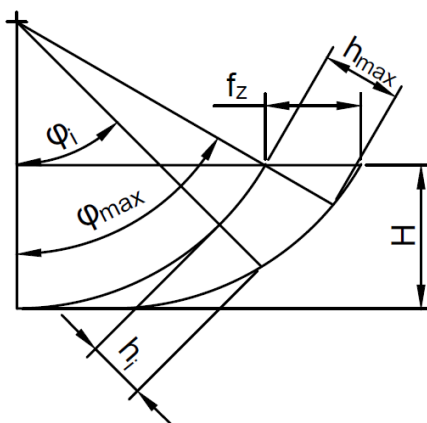
- $k_{c1}$  je měrná řezná síla pro tloušťku třísky 1 mm a úhel čela nástroje  $\gamma_o = 0^\circ$ ,
- $m_c$  je exponent, jehož hodnota závisí na fyzikálních vlastnostech materiálu obrobku a řezných podmínkách,
- $h_m$  je skutečná tloušťka třísky.

Tloušťka třísky není při frézování konstantní, ale vždy se mění. U válcového frézování sousledného se mění od maximální hodnoty do nulové, u nesousledného je nejprve nulová a na konci řezu maximální [6]. Periodicky se tedy mění i průřez třísky a tím i velikost silového zatížení. Při frézování může být v záběru v jeden okamžik více břitů frézy. Záběr břitů je přerušovaný a vzniká dělená tříska [4]. Frézování se z hlediska kinematiky dělí na frézování čelní a frézování válcové, válcové frézování se dále dělí na sousledné a nesousledné. U všech druhů frézování je tloušťka třísky závislá na pootočení frézy  $\varphi$ . Tuto závislost ilustruje obrázek 1.2. Jmenovitá tloušťka třísky v libovolném okamžiku odřezávání je vyjádřena vztahem [7]:

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i, \quad (1.2)$$

kde:

- $\varphi_i$  je úhel posuvového pohybu,
- $f_z$  je posuv na zub a
- $h_i$  je jmenovitá tloušťka třísky.



Obr. 1.2 Změna tloušťky třísky v závislosti na úhlu pootočení frézy [7].

### 1.1.2 Průřez třísky při čelním frézování

Hodnota jmenovitého průřezu třísky se stanoví podle vztahu [7]:

$$A_{Di} = b_i \cdot h_i, \quad (1.3)$$

kde

$$h_i = f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i \quad (1.4)$$

a

$$b_i = \frac{a_p}{\sin \kappa_r}. \quad (1.5)$$

Po dosazení je hodnota  $A_{Di}$  rovna

$$A_{Di} = f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi_i. \quad (1.6)$$

Maximální velikosti jmenovitého průřezu třísky je dosaženo při  $\varphi = 90^\circ$  [7].

### 1.1.1 Průřez třísky a síla při válcovém frézování

Určení plochy průřezu při válcovém frézování odpovídá analýze šroubového konoidu a je možné ji odvodit pro každý zub a každý úhel záběru. Velikost průřezu třísky se v průběhu frézování postupně mění a v souvislosti s touto časovou změnou dochází ke změně měrné řezné síly, celkového zatížení zubu frézy i řezného výkonu. Element plochy průřezu třísky lze získat ze vztahu [4]:

$$dA_D = f_z \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{s_s}{2\pi}\right)^2} \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \quad (1.7)$$

Po integraci pro rozsah úhlu záběru břitů  $\varphi_1$ – $\varphi_2$  získáme vztah [4]:

$$A_D = f_z \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{s_s}{2\pi}\right)^2} \cdot \sum_{i=1}^{Z_z} (\cos \varphi_{1i} - \cos \varphi_{2i}) \quad (1.8)$$

Průběh měrné řezné síly jako funkce tloušťky třísky a vlastností materiálu je možné stanovit jako [4]:

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h^{mc}} = \frac{k_{c1}}{(f_z \cdot \sin \varphi)^{mc}} \quad (1.9)$$

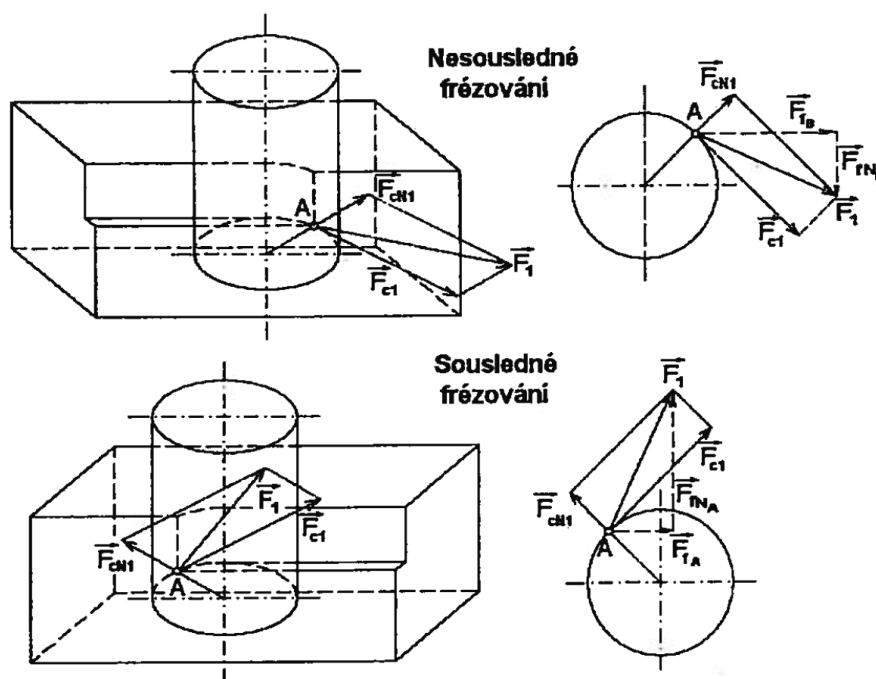
Elementární řezná síla odpovídající tloušťce třísky  $h$  se stanoví dle vztahu:

$$dF_c(h) = dA_D \cdot k_c \quad (1.10)$$

Po dosazení do vztahu (1.10) a následné úpravě získáváme vztah pro výpočet řezné síly pro všechny zuby v záběru, který je zpravidla nutné řešit numerickou integrací [8]:

$$F_C = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{R^2 + \left(\frac{s_s}{2\pi}\right)^2} \cdot k_{c1} \cdot f_z^{1-mc} \cdot \sin \varphi^{1-mc} \cdot d\varphi = c_0 \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi^{1-mc} \cdot d\varphi \quad (1.11)$$

Při různých podmínkách obrábění dochází různým způsobem k rozkladu složek výsledné síly. To je patrné z obrázku číslo 1.3, který znázorňuje rozklad sil při sousledném a nesousledném frézování. Vlivem změny obráběného materiálu, průřezu třísky a způsobu frézování dochází ke změně silového zatížení. Sousledné frézování je proto výhodnější zejména u obrábění na CNC strojích, obvykle je možno tímto způsobem dosáhnout i kvalitnějšího obrobeného povrchu. Na změnu silového zatížení má dále významný vliv také stav opotřebení nástroje [1,4]. Vlivem opotřebení dochází ke změně směru i velikosti vektoru silového zatížení. Na začátku bývá nástroj vlivem pozitivního úhlu čela vtahován do řezu, zatímco na konci trvanlivosti je od obrobku odtlačován [9].



Obr. 1.3 Silový rozklad při sousledném a nesousledném obrábění [4].

## 1.2 Měření silového zatížení

Měření sil při frézování je možné provádět dvěma způsoby. Jedná se o přímé a nepřímé měření. Nepřímé měření spočívá v měření jiné veličiny než síly. Pomocí této veličiny se následně výpočtem stanoví velikost síly. Mezi nedostatky této metody patří to, že touto metodou lze zjistit pouze velikost tangenciální složky řezné síly, nikoli její směr. Přímé metody měření spočívají v měření všech složek silového zatížení. Velmi často je také možné hodnoty měření zaznamenávat. Pro měření silového zatížení pomocí přímých metod se využívá dynamometrů nebo tenzometrických měřicích sestav [10].

### 1.2.1 Nepřímé metody

Při stanovení sil pomocí nepřímých metod se nejčastěji užívá výkonu elektromotoru obráběcího stroje. Využívá se vztahu pro užitečný výkon při obrábění:

$$P_{už} = F_c \cdot v_c. \quad (1.12)$$

Z uvedeného vztahu ovšem vyplývá, že pomocí nepřímého měření lze z výkonu hnací jednotky stanovit pouze tangenciální složku řezné síly. Pro měření výkonu stroje se používá wattmetrů, které při měření výkonu střídavého proudu dávají, oproti jiným metodám, přímý údaj. Vychází se z užitečného výkonu potřebného k vlastnímu řezání. Nejprve se změří výkon nezatíženého obráběcího stroje, tj. výkon naprázdno, a následně výkon obráběcího stroje při obrábění. Rozdílem těchto dvou hodnot je potom dán užitečný výkon, který je vyvolaný tangenciální složkou řezné síly  $F_c$  [11].

$$P_{už} = P_c - P_o \quad (1.13)$$

Tangenciální složka řezné síly je potom vyjádřena ze vztahu (1.12) jako [11]:

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c} \quad (1.14)$$

Uvedená metoda měření je velmi jednoduchá a nevyžaduje žádné speciální vybavení. Je však také značně nepřesná, a to zejména z důvodu zanedbání vlivu ostatních složek celkové síly a také z důvodu rozdílné účinnosti stroje při zatížení a při chodu naprázdno [13]. Moderní CNC obráběcí centra mají možnost sledování aktuálního stavu zatížení motoru pomocí softwaru. V závislosti na okamžité zátěži je potom možné obráběcí proces přímo ovlivňovat zásahem do velikosti jednotlivých veličin [10]. Tangenciální složku řezné síly je možné stanovit i ze změřeného točivého momentu. Této možnosti se nejvíce využívá při vrtání. Proveďte se změření výkonu stroje pomocí přenosného zapisovacího přístroje, následně se nástroj vysune ze záběru a při stejných otáčkách se vřeteno obráběcího stroje zatěžuje mechanickou brzdou, dokud se nedosáhne stejného výkonu, jako při obrábění. Z točivého momentu vyvolaného brzdou ( $M_{kb}$ ), který se rovná točivému momentu na vřetenu nástroje, lze jednoduše dopočítat tangenciální složku řezné síly dle vztahu [11]:

$$M_{kb} = M_k = \frac{F_c \cdot D}{2} \quad (1.15)$$

Způsob měření síly pomocí momentu se však v praxi využívá pouze minimálně [11].

### 1.2.2 Přímé metody

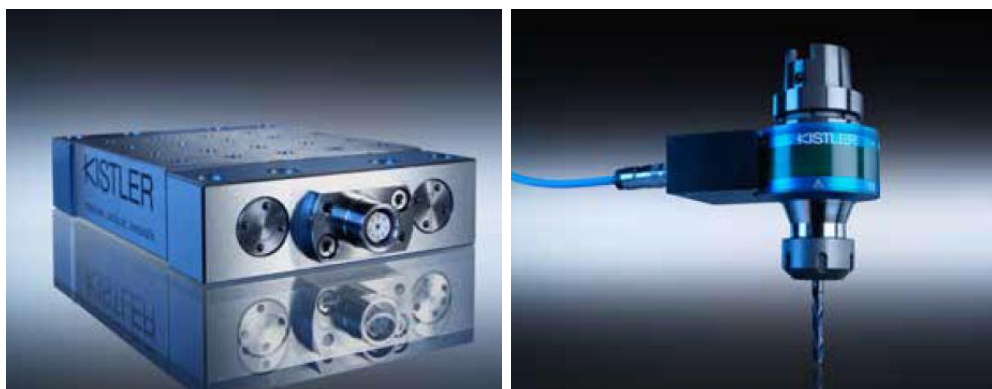
Přímé měření složek řezné síly a momentů se realizuje pomocí měření deformací v soustavě stroj-nástroj-obrobek během obrábění. K takovému měření se využívá přístroj zvaný dynamometr. Je nutné, aby měřená veličina byla nezávislá na provozních podmínkách dynamometru. Dále musí dynamometr být schopen měřit sledovanou veličinu v požadovaném rozsahu a s požadovanou přesností. Mezi základní požadavky kladené na dynamometry patří tuhost. Tuhost je dána velikostí zatěžující síly, která působí na deformační element a vyvolává určitou deformaci. Velikost deformace je závislá na tvaru a provedení deformačního elementu. Další důležitou vlastností dynamometru je také citlivost. Dobrý dynamometr by měl dosahovat citlivosti a přesnosti v rozmezí  $\pm 1$  %. To znamená, že pokud je dynamometr navržen pro měření síly o velikosti 100 N, pak přírůstek síly o velikosti 1 N by měl být přesně změřitelný a čitelný. Důležitými vlastnostmi jsou také stálost a reprodukovatelnost údajů. Konstrukce by měla být provedena tak, aby se měření jednotlivých složek sil vzájemně neovlivňovalo. Soustava pro měření silového zatížení se obecně skládá z [12,13]:

- pružného členu – přebírá zatížení a deformuje se,
- snímače – mění mechanickou veličinu na hodnotu analogického parametru,
- přijímače – zpracovává a zesiluje signál, případně zapisuje.

Dělení dynamometrů [11]:

- podle počtu měřených složek síly na jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a dynamometry umožňující navíc měření točivých momentů,
- podle metody měření na mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické (piezoelektrické), optické atd.,
- podle metody obrábění na dynamometry pro soustružení, frézování, broušení, vrtání.

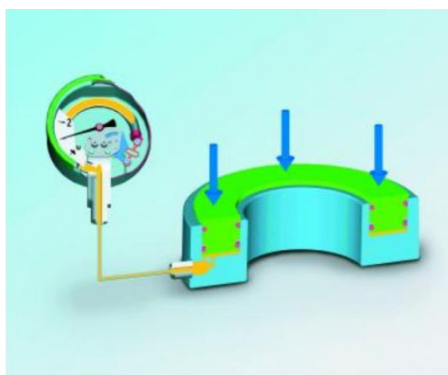
Na obrázku 1.4 je vidět třísložkový stacionární dynamometr a rotační dynamometr pro měření točivých momentů.



Obr. 1.4 Stacionární (vlevo) a rotační dynamometr (vpravo) [14].

Dle použité metody měření se dále mohou používat dynamometry mechanické, ty se nejčastěji využívají pro cejchování jiných dynamometrů, protože u nich lze vyloučit nežádoucí rušivé vlivy. Jsou charakteristické naprosto lineárním vztahem mezi naměřenými údaji a sledovanou silou. Působení síly se zde přenáší přímo nebo znásobeně mechanickým převodem na měřicí prvek. Velikost síly je dána deformací silové pružiny, kroužku, třmenu, nosníku nebo membrány. Mezi hlavní představitele těchto dynamometrů patří dynamometry třmenové. Tyto dynamometry jsou jednoduché, spolehlivé, ale z důvodu velké setrvačnosti jsou nevhodné pro dynamická měření. Další nevýhodou je závislost přesnosti na teplotě, obtížná změna rozsahu měření, únava materiálu a nutnost vymezování vůlí [11].

Hydraulické dynamometry měří sílu nebo moment jako změnu tlaku v kapalině vyvolanou působením na membránu nebo píst hydraulického obvodu. Změna tlaku je následně snímána pomocí manometru. Mezi výhody těchto dynamometrů patří jednoduchá konstrukce a možnost práce i bez přívodu elektrické energie. Může být navíc dodán zároveň s přípravkem, který umožňuje demontáž snímače i pod tlakem a bez úniku hydraulické kapaliny. Nevýhodami jsou nízká citlivost a nutnost dokonalého utěsnění systému. Princip hydraulického snímače je zobrazen na obrázku 1.5 [13,15].



Obr. 1.5 Princip hydraulického snímače [15].

Pneumatické dynamometry využívají k měření sil změny tlaku nebo průtoku vzduchu v závislosti na změně výtokového průřezu mezi klapkou a tryskou v deformačním elementu. Mezi výhody patří snadná obsluha i údržba a nízké náklady [13].

Mezi nejrozšířenější a nejvíce využívané v praxi patří dynamometry elektrické. Hlavními výhodami těchto dynamometrů jsou snadný přenos signálu s řadou možných úprav,

miniaturní rozměry a možnost snímání signálu u rotujících součástí a součástí v pohybu. Podle způsobu transformace mechanické energie na energii elektrickou lze elektrické dynamometry rozdělit do dvou skupin [11]:

- parametrické – jsou založeny na změně jednoho z parametrů elektrického obvodu,
- generátorové – jsou založeny na vzniku napětí v závislosti na deformaci elementu.

Parametrické elektrické dynamometry se dále dělí na [11]:

- indukční,
- kapacitní,
- odporové.

Indukční dynamometry využívají změny velikosti vzduchové mezery vlivem působící síly, čímž se mění indukčnost cívky. Podobně i kapacitní dynamometry využívají k měření síly změnu kapacity snímače. Nejjednodušším kapacitním snímačem je deskový kondenzátor s proměnnou vzdáleností mezi elektrodami. Kapacitní snímače mají dobrou citlivost a malou hmotnost, jsou ale značně citlivé na okolní vlivy a náročné na měřicí techniku. Indukčních i kapacitních dynamometrů se využívá zřídka [13].

#### **Odporové snímače – tenzometry**

Z odporových snímačů se nejčastěji používá odporových tenzometrů. U odporových tenzometrů se využívá změny odporu vodiče vyvolané deformací vodiče nebo polovodiče, který se deformuje spolu s deformačním elementem vlivem působení síly obrábění nebo točivého momentu. Při deformaci dochází ke změně délky i průřezu vodiče v tenzometru, tato změna vyvolá změnu odporu vodiče [11].

Dle konstrukce se tenzometry dělí na [11]:

- kovové,
- polovodičové.

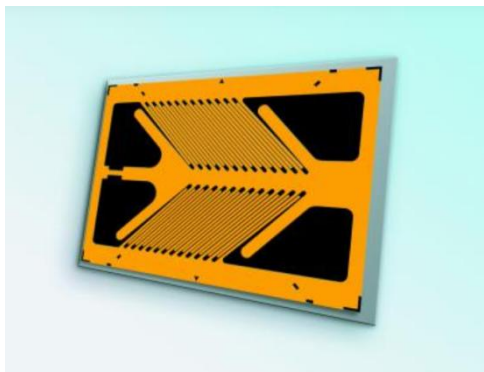
Kovové se dále dělí na [13]:

- drátkové,
- fóliové,
- napařovací.

Z kovových jsou při dynamometrickém měření sil nejrozšířenější tenzometry drátkové. Polovodičové tenzometry využívají piezorezistentních vlastností některých materiálů, jako je například křemík nebo germanium. Tenký pásek z monokrystalu, deformovaný vlivem vnějšího zatížení, mění svůj odpor. Tenzometr je zobrazen na obrázku 1.6. Tyto tenzometry mají velmi dobré vlastnosti, jejich výroba je však značně pracná i nákladná, z tohoto důvodu nepatří mezi nejrozšířenější. Měření změn odporu lze provádět buď potenciometricky, nebo pomocí můstkového zapojení. Můstkové zapojení jednotlivých odporů může být realizováno několika způsoby, z nichž každý má své výhody a omezení. Pomocí různých zapojení tenzometrů a použití různých deformačních elementů je možné realizovat několik druhů tenzometrických dynamometrů. Dvousložkový dynamometr je konstruován k využití pro soustružení, je schopen měřit složky síly řezání  $F_c$  a  $F_p$ . Třísložkový dynamometr používá zpravidla osm snímacích článků, které jsou nalepeny na deformačních elementech. Univerzální dynamometr je určen pro snímání složek síly  $F_c$ ,  $F_p$ ,



$F_f$  i krouticího momentu. Zde je pro přenos síly řezání a točivého momentu využito celkem 16 měřicích článků [11].



Obr. 1.6 Tenzometrický snímač síly [15].

### 1.2.3 Piezoelektrický dynamometr

Z hlediska principu činnosti jsou nejpožívanějšími dynamometry piezoelektrické. Tyto snímače využívají piezoelektrického jevu, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů v důsledku vnějšího mechanického zatížení [13]. Náboj vzniká vlivem deformace mřížky, v níž jsou uloženy pozitivní a negativní částice. Změnou jejich polohy dochází k vytvoření elektrického dipólu. Závislost velikosti vzniklého náboje na deformaci krystalu ukazuje obrázek 1.9. Podle směru působení zatížení na krystal rozlišujeme dva typy piezoelektrického jevu [16]:

- podélný jev,
- střížný jev.

#### Podélný jev

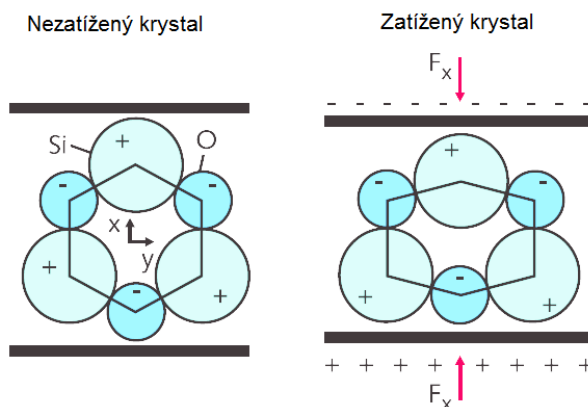
Při podélném piezoelektrickém jevu je měřitelný elektrický náboj generován na povrchu krystalového disku, na který působí zatížení. Při tomto jevu je velikost náboje závislá pouze na velikosti působícího zatížení, nikoli na rozměrech disku. Jediným způsobem, jak zvětšit vzniklý náboj, je použití několika disků v sérii, které jsou propojeny paralelně, jak ukazuje obrázek 1.8. Velikost vzniklého náboje je potom dána vztahem [16]:

$$Q_x = d_{11} \cdot F_x \cdot n_d, \quad (1.16)$$

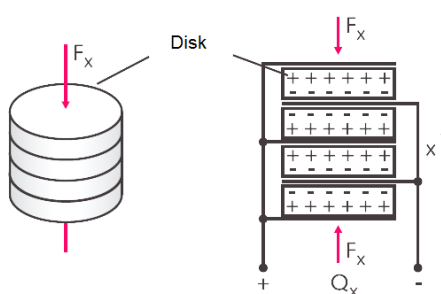
kde:

- $d_{11}$  je piezoelektrický koeficient,
- $F_x$  je působící síla,
- $n_d$  je počet disků.

Piezoelektrický koeficient je závislý na směru a vyjadřuje míru citlivosti v odpovídajícím směru. Způsob řezu krystalem určuje jeho vlastnosti a také použití. Piezoelektrické prvky vyřiznuté pro použití při podélném jevu jsou citlivé na tlakové namáhání, a proto jsou vhodné k použití u jednoduchých a robustních senzorů [16]. Princip vzniku náboje při podélném piezoelektrickém jevu je znázorněn na obrázku 1.7.



Obr. 1.7 Podélný jev [14].



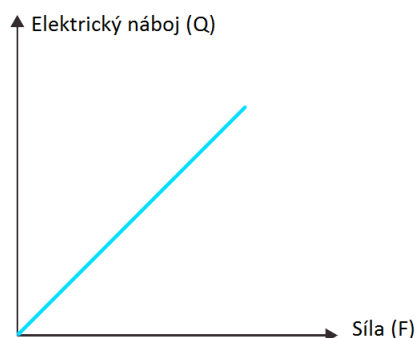
Obr. 1.8 Použití několika disků v sérii [16]

### Střížný jev

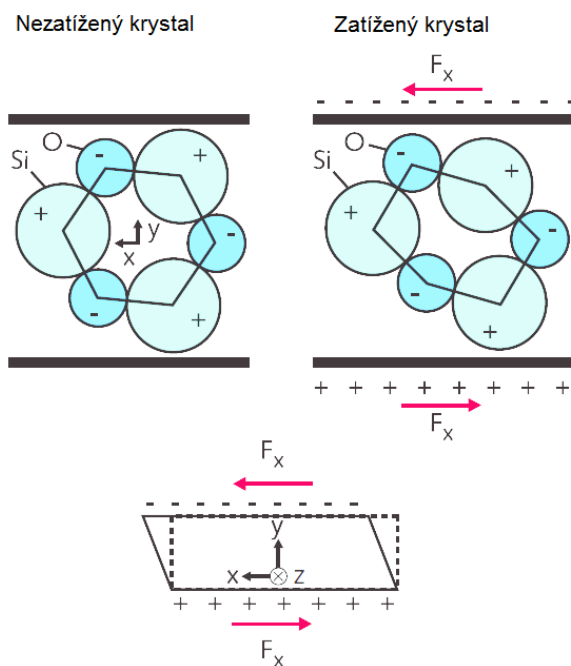
Podobně jako v případě podélného jevu je u střížného jevu piezoelektrická citlivost nezávislá na velikosti a tvaru piezoelektrického prvku. I zde náboj vzniká na zatížených površích. V případě zatížení ve směru osy  $x$   $n$  prvků spojených mechanicky sériově a elektricky paralelně je výsledný náboj roven [16]:

$$Q_x = 2 \cdot d_{11} \cdot F_x \cdot n_d, \quad (1.16)$$

Střížný jev se používá pro senzory měřící střížové síly, točivé momenty a napětí. Tyto prvky jsou vhodné pro senzory, jejichž výkon není ovlivněn teplotními změnami, protože změny napětí způsobené teplotními změnami působí ve směru kolmém k ose měřeného zatížení [16]. Princip vzniku náboje při střížném piezoelektrickém jevu je znázorněn na obrázku 1.10.



Obr. 1.9 Závislost generovaného náboje na deformaci krystalu [14].

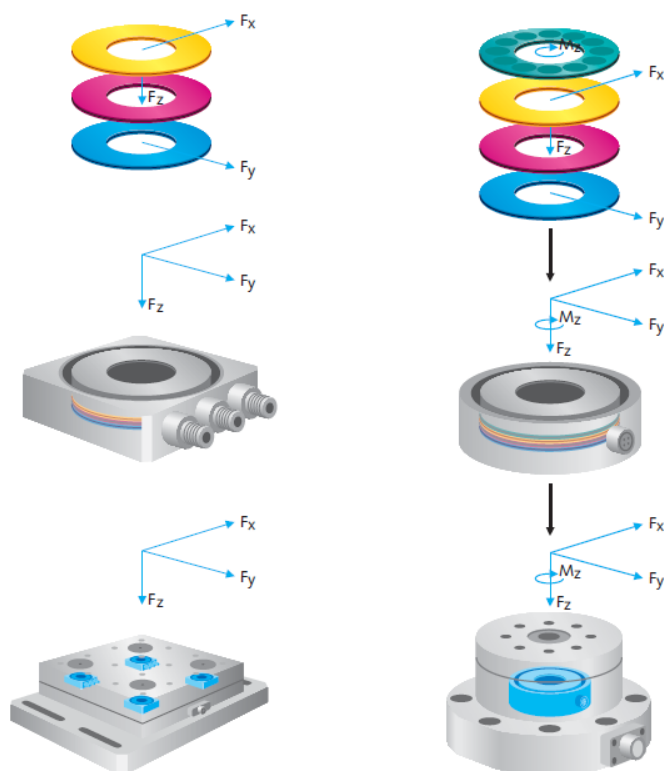


Obr. 1.10 Střížný jev [16].

### Piezoelektrické materiály

Piezoelektrický jev objevili Pierre a Jacques Curieovi v roce 1880. První skupinou piezoelektrických materiálů byly krystalické piezoelektrické materiály. Jedním z prvních, který se začal využívat, byl krystal křemene ( $\text{SiO}_2$ ). Tento materiál se využívá dodnes, protože má řadu výhodných vlastností, jako je chemická odolnost, jednoduchá struktura a další. Je základem převodníků mechanických veličin nebo křemenných rezonátorů. Mezi významné krystalické látky dále patří Lithium Niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ) a Lithium Tantalate ( $\text{LiTaO}_3$ ), tyto byly objeveny v 60. letech 20. století a své využití našly hlavně v optice. Další skupinou materiálů jsou keramické materiály. Prvním keramickým materiálem byl titaničitan barnatý ( $\text{BaTiO}_3$ ). Tento materiál byl však záhy doplněn roztokem titaničitanu olovnatého ( $\text{PbTiO}_3$ ) a zirkoničitanu olovnatého ( $\text{PbZrO}_3$ ), tzv. keramikou PZT. PZT keramika v dnešní době patří mezi nejpoužívanější piezoelektrické keramické materiály. Z PZT keramiky se následně zhotovují nejrůznější tvary, které se následně pokovují a používají v ultrazvukové technice [17].

Piezoelektrické snímače jsou vhodné pro měření dynamického silového zatížení, zatímco tenzometrické jsou vhodnější pro měření statického silového zatížení [14,16]. Konstrukce piezoelektrického dynamometru je patrná z obrázku 1.11.



Obr. 1.11 Konstrukce třísložkového (vlevo) a čtyřsložkového (vpravo) piezoelektrického dynamometru [16].

#### 1.2.4 Sestava pro měření silového zatížení

##### Dynamometr

Nejdůležitější částí sestavy je samotný dynamometr. Dochází v něm ke vzniku slabého elektrického náboje, ten je následně přenesen pomocí odstíněného a dobře izolovaného kabelu na zesilovač napětí. Pro zachování přesnosti a spolehlivosti měřicího systému je nutné dbát na stabilitu a kvalitní utěsnění systému proti vniknutí procesní kapaliny a jinému znečištění [16].

##### Propojovací kabel

Spolehlivé propojení dynamometru a zesilovače signálu je zásadní pro zajištění kvality a stability měření. Používá se speciálně izolovaný kabel, který je chráněn v uzavřeném kovovém plášti, díky čemuž je vhodný pro použití v dílnách a na obráběcích pracovištích. Kabel je na koncích vybaven robustním konektorem, který je chráněn proti vniknutí prachových částic i kapaliny [16].

##### Vícekanálový zesilovač napětí

Vícesložkové dynamometry vyžadují zesilovače napětí pro příslušný počet kanálů. Tyto přístroje jsou většinou konstruovány pro volitelný počet kanálů. Potřebné parametry je možné nastavit na přístroji přímo nebo k aktivaci a nastavení dochází propojením s počítačem a měřicím softwarem [16].

### Výstup dat

Pro získání a analýzu dat je nezbytný příslušný software. Pomocí něj lze nastavovat důležité parametry zesilovače, získaná data je možné graficky znázornit a lze snadněji provést analýzu řezné síly. Díky tomuto softwaru je také jednodušší dokumentace a export dat. Například firma Kistler nabízí ke svým dynamometrům software DynoWare, který umožňuje získání a analýzu naměřených dat [16].

### 1.4 Tenkostěnné součásti

Z důvodu zvyšujících se nároků na výkon a nutnosti snižování hmotnosti je velké množství součástí v leteckém průmyslu tenkostěnných. Tyto součásti se díky jejich nízké tuhosti velmi snadno deformují vlivem řezného procesu, výsledkem je negativní ovlivnění kvality obrobku i nedostatečná přesnost. Dokončovací obrábění takovýchto součástí je z důvodu postupného snižování tloušťky stěny velmi komplikované. Dochází k dynamickému i statickému zatěžování součásti a ke specifickým deformacím. Z experimentů vyplývá, že hlavní příčinou vzniku deformací obráběné součásti je elastická deformace vzniklá působením řezné síly. Pro určení řezných sil a deformací se velmi často využívá simulace pomocí metody konečných prvků. Některé výzkumy chápou nástroj jako ideálně tuhý a řeší deformaci obrobku, jiné považují naopak obrobek za nepoddajný a některé předpokládají deformaci jak nástroje, tak i obrobku. Cílem experimentů je velmi často měření deformací, popřípadě měření zatížení a dopočítání deformací a následná úprava NC programu, která zaručí eliminaci chyby, vzniklé deformací obráběné součásti nebo nástroje [18,19].

Podle [19] jsou jako tenkostěnné součásti uvažovány ty, jejichž tloušťka stěny  $h_s$  je v poměru k výšce součásti  $b_s$  v rozmezí:

$$\left(\frac{1}{80} \div \frac{1}{100}\right) b_s < h_s < \left(\frac{1}{8} \div \frac{1}{5}\right) b_s \quad (1.12)$$

Metody obrábění tenkostěnných součástí se odlišují v závislosti na výšce a tloušťce dané součásti. Potřebný počet průchodů nástroje je určen rozměry stěny a axiální hloubkou řezu. Doporučuje se použití parametrů vysokorychlostního obrábění, jako jsou malá axiální i radiální hloubka řezu a vysoká řezná rychlost. Tyto parametry zkracují dobu záběru nástroje a v důsledku toho také snižují rázy a průhyb. Před obráběním je nutné provést analýzu stability jak nástroje, tak i obráběné součásti. Je výhodné použití sousledného frézování. Následující metody jsou vhodné pro frézování jak slitin hliníku, tak i slitin titanu [20].

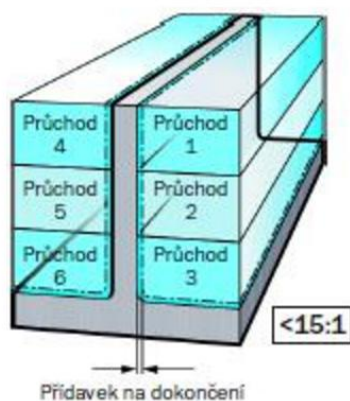
Při frézování lze tenkostěnné součásti rozdělit do několika skupin [20]:

- malý poměr výšky k tloušťce  $<15:1$ , tj. menší než  $\frac{1}{15} b_s = h_s$ ;
- střední poměr výšky k tloušťce  $<30:1$ , tj. menší než  $\frac{1}{30} b_s = h_s$ ;
- velmi vysoký poměr výšky k tloušťce  $>30:1$ , tj. větší než  $\frac{1}{30} b_s = h_s$ .

#### 1.4.1 Malý poměr výšky k tloušťce

U součástí tohoto typu je vhodné provádět frézování „cikcak“, kdy se obrobí na několik průjezdů stěna z jedné strany a poté na stejný počet průjezdů z druhé strany. Průjezdy se vzájemně nepřekrývají. Na obou stranách se nechá přírůstek na následné dokončovací

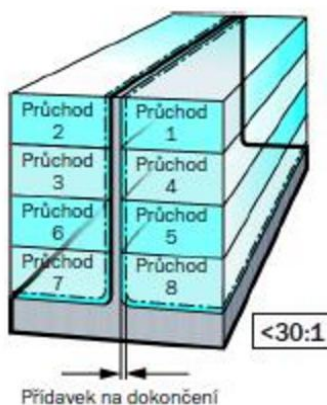
frézování. Frézování součástí s malým poměrem výšky k tloušťce je znázorněno na obrázku číslo 1.12 [20].



Obr. 1.12 Frézování součástí s poměrem <15:1 [20].

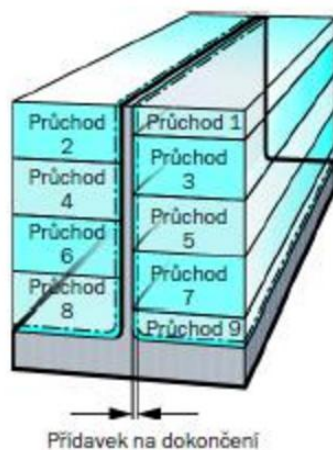
#### 1.4.2 Střední poměr výšky k tloušťce

Může se použít nepřekrývané frézování – frézování po vrstevnici, které je zobrazeno na obrázku 1.13, nebo je možné použít překrývané frézování, které je popsáno níže [20].



Obr. 1.13 Nepřekrývané frézování [20].

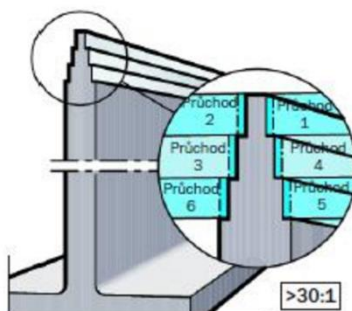
Při překrývaném frézování se obrábí podobným způsobem jako u nepřekrývaného, ale využívá se vzájemného přesahu mezi jednotlivými průchody, čímž se dosáhne vyšší opory v místě řezu. První průjezd se realizuje se sníženou hloubkou řezu na poloviční hodnotu axiální hloubky řezu. Překrývané frézování je znázorněno na obrázku číslo 1.14 [20].



Obr. 1.14 Překrývané frézování [20].

#### 1.4.3 Velmi vysoký poměr výšky k tloušťce

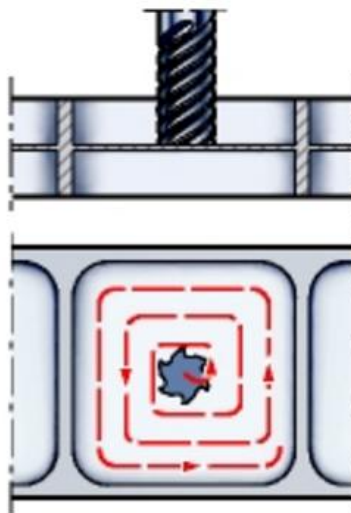
Pro obrábění součástí s velmi vysokým poměrem výšky k tloušťce se využívá princip tzv. „vánočního stromku“. Využívá se nepřekrývaného frézování s postupným přibližováním na požadovanou tloušťku součásti. Tenčí část obrobku je vždy podpírána tlustší částí pod ní, tím je dosaženo větší tuhosti. Metoda je znázorněna na obrázku 1.15 [20].



Obr. 1.15 Metoda „vánoční stromeček“ [20].

#### 1.4.4 Obrábění součástí s tenkostěnným dnem

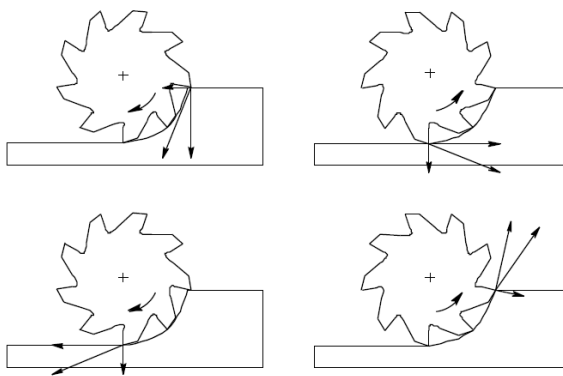
Při obrábění takovýchto součástí je vhodné využít postupného zahlubování pomocí kruhové interpolace pro dosažení hloubky dna a následné frézování směrem ven s využitím okružní dráhy pro postupné zahlubování, jak je vidět na obrázku číslo 1.16. V případě frézování povrchu, jehož druhá strana je již obrobena, je vhodné použití nástroje s co největším počtem zubů, což zaručí co nejnížší tlak na stěnu obrobku. Pokud má součást otvor ve středu dna, je vhodné ponechat pomocnou příčku, obrobit z obou stran a následně odstranit pomocnou příčku [20].



Obr. 1.16 Obrábění tenkostěnného dna [20].

### Technologie frézování

Použití sousledného frézování je výhodnější z hlediska dosažení výsledné kvality povrchu. Jak je patrné z obrázku číslo 1.17, při sousledném frézování nedochází k tak výrazným změnám směru působení výsledné síly jako při frézování nesousledném. Změny směru působení síly mají za následek rozkmitání obrobku a zhoršení kvality výsledného obrobku [21].



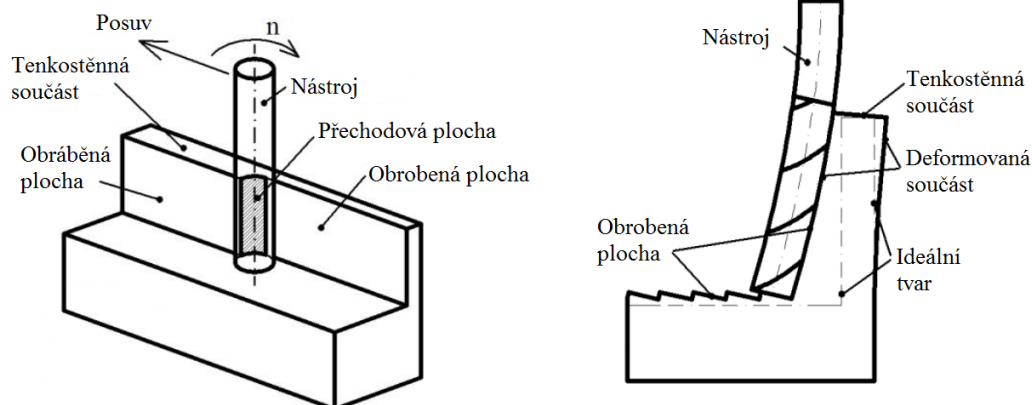
Obr. 1.17 Působení sil při sousledném (vlevo) a nesousledném (vpravo) frézování [21].

### 1.5 Problémy při obrábění tenkostěnných součástí

Tenkostěnné součásti jsou hojně využívány v různých odvětvích průmyslu. Jejich obrábění však není zcela bezproblémové a je značně ovlivněno působícími silami [19].

V ideálním případě jsou síly působící na nástroj i obráběnou součást natolik malé, že nezpůsobují žádnou deformaci během obrábění. Vlivem rostoucího opotřebení nástroje nebo změny radiální hloubky řezu ale může dojít k nárůstu hodnoty působící síly, která vyvolá elastickou deformaci v soustavě nástroj-obrobek [22]. Obvodové frézování tenkostěnné součásti a deformace způsobující zhoršení obrobku jsou znázorněny na obrázku číslo 1.18.

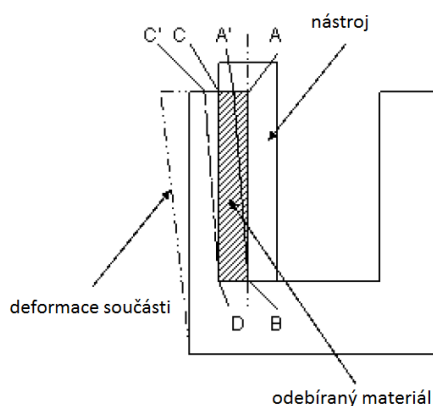




Obr. 1.18 Obvodové frézování tenkostěnné součásti (vlevo), zhoršení kvality obrobeného povrchu vlivem deformace nástroje (vpravo) [22].

V dosavadních výzkumech je proces chápán různými způsoby. V některých experimentech je nástroj chápán jako tuhý a tedy nedochází k jeho deformaci. Jiní autoři chápou naopak součást jako dokonale tuhou a dochází pouze k deformaci nástroje. Jinde je uvažována jak deformace nástroje, tak i deformace obráběné součásti. Tuhost nástroje i obrobku může být stanovena analyticky nebo numericky s pomocí MKP [19].

Jak již bylo zmíněno výše, vlivem působících sil a také vlivem malé tuhosti součásti je tenkostěnná součást při obrábění deformována. Vzniklá deformace způsobuje nepřesnost rozměrů výsledné obrobené součásti. Problém je znázorněn na obrázku číslo 1.19. Vyšrafovaná oblast ABCD znázorňuje materiál, který má být odebrán. Vlivem silového působení na obráběnou stěnu ale dochází k deformaci, která způsobí obrobení pouze oblasti A'BCD. Po odstranění nástroje z řezu se pružná stěna vrátí do původní polohy a materiál CC'D, který měl být při obrábění odebrán, způsobuje rozměrovou nepřesnost [23].



Obr. 1.19 Deformace tenké stěny při zatížení silovým působením [23].

### 1.5.1 Deformace nástroje

Průhyb reálného frézovacího nástroje je dán energií napjatosti, která zahrnuje ohybový moment  $M_y$ , smyk  $T_z$  a krouticí moment  $M_k$  a jejich derivace podle působící síly. Toto lze vyjádřit ve tvaru [24]:

$$w_F = \frac{\partial W}{\partial F} = \frac{1}{E} \int_l \frac{M_y(x)}{I_y(x)} \cdot \frac{\partial M_y(x)}{\partial F} dx + \frac{\beta}{6} \int_l \frac{T_z(x)}{G(x)} \cdot \frac{\partial T_z(x)}{\partial F} dx + \frac{1}{G} \int_l \frac{M_k(x)}{I_p(x)} \cdot \frac{\partial M_k(x)}{\partial F} dx \quad (1.13)$$

Deformaci stopkové frézy pak lze zjednodušit na válcový nosník, jak je vidět na obrázku číslo 1.20. Lze ji vyjádřit rovnicí pro průhyb ve tvaru [24]:

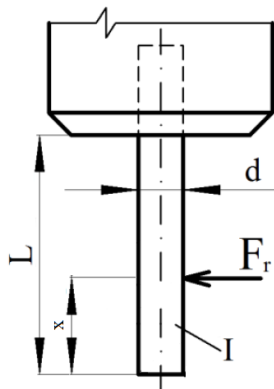
$$w(x) = \frac{F_r}{6EI} \cdot (2 \cdot L^3 - 3 \cdot L^2 \cdot x + x^3), \quad (1.14)$$

kde:

- $F_r$  je síla působící na nástroj v radiálním směru,
- $L$  je délka vetknutého nosníku – vysunutí frézy,
- $x$  je vzdálenost působistě radiálně působící síly,
- $I$  je kvadratický moment průřezu frézy,
- $E$  je Youngův modul pružnosti nástrojového materiálu.

Kvadratický moment průřezu frézy pro zjednodušený kruhový průřez je roven [19]:

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad (1.15)$$



Obr. 1.20 Model nástroje zjednodušeného na válcový nosník [22].

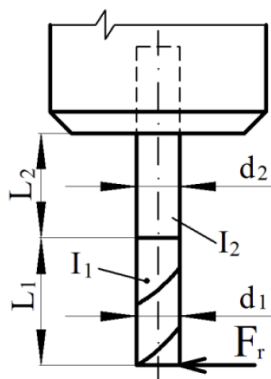
V jiné odborné literatuře můžeme také narazit na výpočet deformace stopkové frézy, složené ze dvou rozdílných průřezů, jak je patrné z obrázku číslo 1.21. Vyjádření deformace pak vypadá následovně [22]:

$$w = \frac{F_r \cdot L_1^3}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{F_r \cdot [(L_1 + L_2)^3 - L_1^3]}{3 \cdot E \cdot I_2}, \quad (1.16)$$

kde:

- $F$  je působící síla na nástroj v radiálním směru,

- $L_1$  je délka řezné části nástroje,
- $L_2$  je délka části nástroje s válcovým průřezem,
- $E$  je Youngův modul pružnosti,
- $I_1$  je kvadratický moment průřezu řezné části frézy,
- $I_2$  je kvadratický moment průřezu válcové části frézy.



Obr. 1.21 Model nástroje složeného ze dvou rozdílných průřezů [22]

Zpřesněním matematického modelu charakterizujícího průhyb stopkových nástrojů lze dosáhnout lepších výsledků pro kompenzování odchylky vzniklé deformací nástroje. Značného zpřesnění při programování polohy nástroje je možné dosáhnout přesnějším určením kvadratického momentu průřezu [24].

### 1.5.2 Deformace obráběné součásti

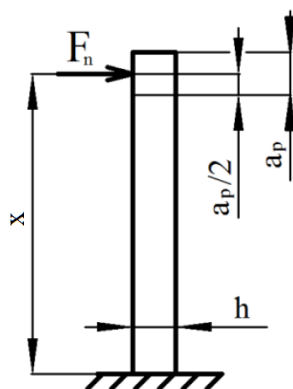
Deformace obráběné součásti tvaru obdélníkového konzolového nosníku je vyjádřena pomocí vztahu [22]:

$$w_L = \frac{12}{E \cdot b \cdot h^3} \left( \frac{F_n \cdot x^3}{3} - 2 \cdot F_n \cdot x^3 \right), \quad (1.17)$$

kde:

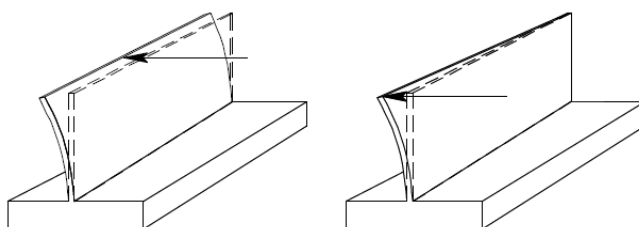
- $F_n$  je normálová síla působící na nosník,
- $b$  je šířka stěny součásti,
- $h$  je tloušťka stěny součásti,
- $E$  je Youngův modul pružnosti,
- $x$  je vzdálenost mezi pevným koncem a působištem síly.

Z uvedeného vztahu tedy vyplývá, že velikost deformace je závislá na velikosti působící síly, rozměrech součásti, materiálu součásti a také na vzdálenosti působišť zatížení od pevného konce součásti. Tento vztah je zjednodušený, protože neuvažuje pozici působícího zatížení v horizontálním směru. Při reálném obrábění dochází ke značné změně velikosti deformace při stejné působící síle a měnící se poloze působícího zatížení [22]. Model deformace obráběné součásti je znázorněn na obrázku číslo 1.22.



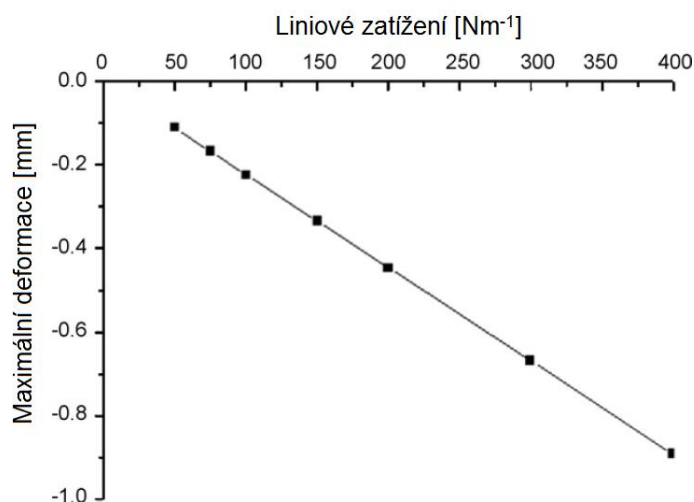
Obr. 1.22 Model obráběné tenkostěnné součásti [22].

Podle [25] se navíc součást deformuje lokálně, nikoli po celé délce stejně. Obrázek ukazuje rozdíl v modelování. Pokud považujeme tenkostěnnou součást za konzolový nosník, jako je tomu na obrázku 1.22, deformace je předpokládána rovnoměrná po celé délce nástroje. U stěny však reálně dochází k výrazně větší deformaci v místě působení síly, zatímco v místech vzdálených od působíště síly může být deformace velmi malá. Obrázek 1.23 znázorňuje tento jev.



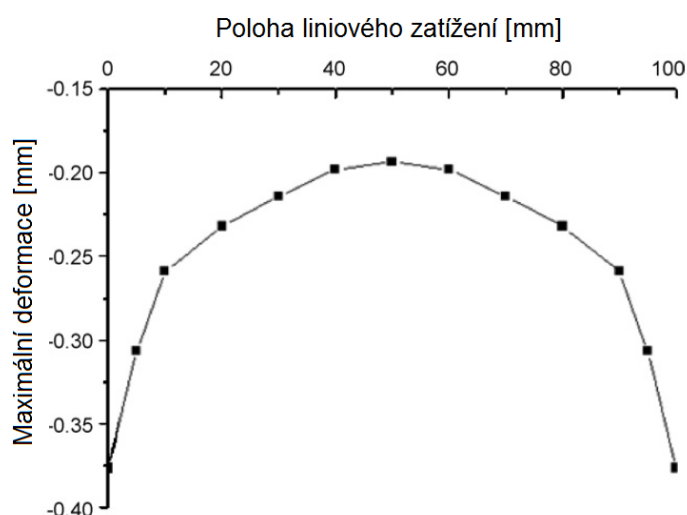
Obr. 1.23 Stejně (vlevo) a realističtější (vpravo) pojetí ohybu tenké stěny [21]

Deformace tenkostěnné součásti je dále také závislá na způsobu zatěžování a poloze působícího zatížení ve směru jak horizontálním, tak i vertikálním. V literatuře [18] je tenkostěnná součást o rozměrech  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  namáhána liniovým zatížením. Simulace byla provedena pomocí systému ANSYS 10.0. Na obrázku číslo 1.24 je vidět lineární závislost velikosti deformace na vzrůstajícím liniovém zatížení. Pokud liniové zatížení nepřetržitě narůstá, velikost deformace překročí hranici malých deformací, což způsobí negativní ovlivnění přesnosti i kvality obrobené součásti [18].



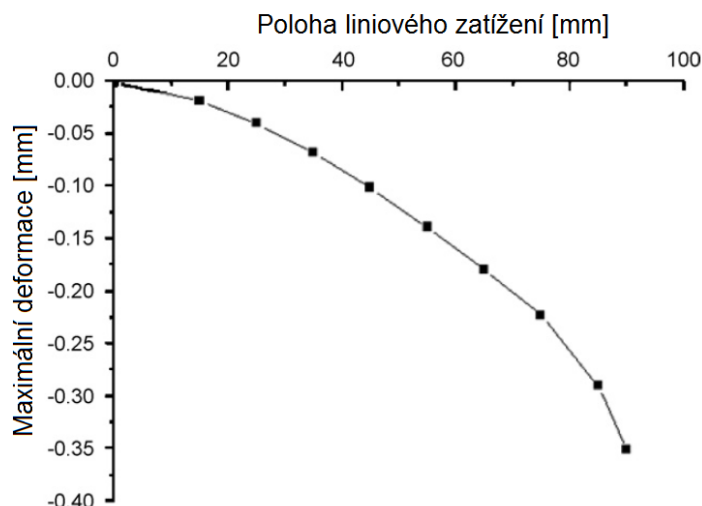
Obr. 1.24 Závislost deformace na velikosti liniového zatížení [18].

Na obrázku číslo 1.25 je znázorněna velikost deformace v závislosti na poloze působícího zatížení v horizontálním směru. Rozložení velikosti deformací je víceméně symetrické vzhledem k středu stěny. Deformace dosahuje maximálních hodnot na okrajích stěny. S posunem zatížení k volným okrajům také dochází k rychlejšímu nárůstu vzniklé deformace [18].



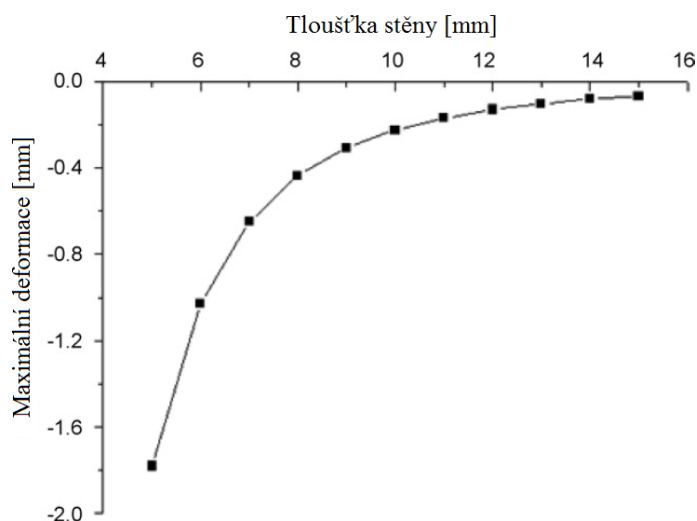
Obr. 1.25 Závislost deformace na poloze zatížení v horizontálním směru [18].

Na obrázku číslo 1.26 je pak vidět závislost deformace na pozici zatížení ve vertikálním směru [10]. Velikost deformace narůstá odspodu směrem nahoru. Nejmenší deformace je v blízkosti pevné hrany, zatímco u volného okraje součásti je velikost deformace největší. Z toho důvodu by při obrábění volného konce součásti měla být snaha minimalizovat silové zatížení, čehož lze dosáhnout volbou vhodných řezných parametrů [18].



Obr. 1.26 Závislost deformace na poloze zatížení ve vertikálním směru [18].

Jak ukazuje obrázek 1.27, maximální deformace je nepřímo úměrná tloušťce stěny. To znamená, že čím tenčí je součást, tím je větší deformace. Navíc pokud se tloušťka stěny zmenší na určitou hodnotu, dochází k rychlému nárůstu deformace. Protože při obrábění tenkostěnných součástí dochází k zmenšování tloušťky stěny, při zachování stejných parametrů obrábění bude docházet i k nárůstu deformací [18].



Obr. 1.27 Vliv tloušťky součásti na velikost deformace [18].

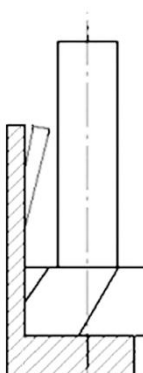
### 1.5.3 Vibrační přechození

Vibrační přechození znamená, že rozvibrovaný tenký obrobek zasáhne rotující nástroj a dojde k destrukci obráběné součásti, jak je vidět na obrázku číslo 1.28. Vibrační přechození je těžké analyzovat, jelikož není zcela jasné, co je příčinou. Je možné, že tento jev vzniká pouze vlivem vibrací, ale je také možné, že na vznik tohoto jevu má vliv i ohyb součásti. Pokud dochází k elastické deformaci nástroje nebo obrobku vlivem ohybu, výsledná tloušťka součásti je menší, než je požadována. U následujících průjezdů nástroje kolem obrobené stěny je potom větší pravděpodobnost vzniku vibračního přechození. Tento efekt možná není hlavní příčinou jevu, ale přinejmenším má na jev špatný vliv [18].



Obr. 1.28 Vibrační přetvoření [26].

Tento jev je podle literatury [21] možné eliminovat jednak předejitím vzniku vibrací, ale také užitím nástroje s odlehčenou stopkou, jako je znázorněno na obrázku číslo 1.29. I když potom součást vibruje, je zamezeno dotyku součásti a nástroje, který by způsobil destrukci součásti.



Obr. 1.29 Použití nástroje s odlehčenou stopkou [27].

#### 1.5.4 Možnosti eliminace nepřesností

##### Konstrukce nástroje

Pro eliminaci nebo zmírnění vychýlení nástroje je možné upravit jeho konstrukci různými způsoby, jako například:

- zpětný kužel – řezná část nástroje není válcová, ale je zde kužel, který při zatížení a vychýlení obráběné součásti vyrovnává deformaci, např. u nástroje Seco JS 522 [28],
- zesílené jádro – jádro je silnější, než u běžných stopkových nástrojů, díky čemuž se zvýší tuhost nástroje a sníží jeho deformace [28],
- jádro z jiného materiálu – pro zvýšení tuhosti nástroje se také užívá jádro vyrobené z jiného materiálu než zbytek nástroje, např. Seco JS 554 [28],

Pro eliminaci vibrací při obráběcím procesu je možné upravení konstrukce způsoby, jako například:

- redukce krčku nástroje – eliminace vibračního přetvoření, které je popsáno výše, např. nástroj Seco JS 554 [28],
- nestejná rozteč zubů – nepravidelná rozteč jednotlivých zubů frézovacího nástroje [29],

- změna stoupání šroubovice – různý úhel stoupání šroubovice u jednotlivých zubů frézovacího nástroje [29].

### **Úprava NC programu**

Další možností, jak vyloučit nepřesnosti, je úprava NC programu. Průhyb nástroje i obráběné součásti je možné zjistit pomocí různých matematických modelů. Do NC programu pro obrábění je pak možné nastavit natočení o daný úhel a tím eliminovat deformaci nástroje i obráběné součásti [19]. Stejně tak je možné na čtyřosých a pětiosých obráběcích centrech využít natočení obráběné součásti, čímž se docílí podobného efektu. Kompenzace ohybu nástroje pomocí úpravy NC programu se jeví jako poměrně přesná a ekonomicky výhodná metoda v případech, kdy není možné využít jiných dokončovacích metod, jako např. broušení [30].



## 2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

### 2.1 Obráběcí nástroj

Pro experiment byl dle zadání vybrán nástroj od firmy Seco, jedná se o monolitní nástroj ze slinutého karbidu řady Jabro Solid.

#### 2.1.1 Seco Jabro JS413120D3SZ3.0

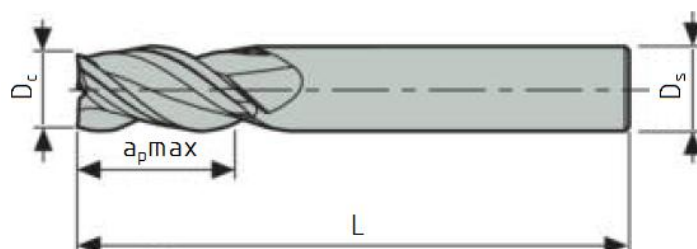
Dle zadání práce byla pro experimentální část vybrána monolitní stopková fréza o průměru 12 mm od firmy Seco. Tato fréza je vyrobena ze slinutého karbidu, je vhodná k obrábění slitin hliníku – skupina materiálů N a je konstruována jako tříbřitá s úhlem sklonu šroubovice 40°. Všechny důležité údaje a rozměry jsou shrnuty v tabulce 1. Fréza je vyobrazena na obrázku 2.1, na obrázku 2.2 jsou zakótovány důležité rozměry.

Tabulka 1 [31].

Kód	JS 413120D3SZ3.0	
$D_c$ [mm]	Průměr řezné části	12
$D_s$ [mm]	Průměr stopky	12
$z$ [-]	Počet zubů	3
$a_{p \max}$ [mm]	Maximální axiální hloubka řezu	50
$L$ [mm]	Celková délka	115
$\lambda$ [°]	Úhel stoupání šroubovice	40
$\gamma$ [°]	Radiální úhel čela	20
$\kappa_r$ [°]	Úhel nastavení hlavního ostří	90



Obr. 2.1 Nástroj JS413120D3SZ3.0.



Obr 2.2 Základní rozměry nástroje [31].

#### 2.1.2 Další nástroje

Další nástroje vhodné pro obrábění tenkostěnných součástí jsou nástroje s redukovanou stopkou pro eliminaci vibračního přetvoření. U takových nástrojů se pomocí ztenčené stopky zamezí náhodnému dotyku obrobene rozvibrované tenkostěnné součásti s rotující řeznou částí nástroje. Tím se eliminuje nebezpečí destrukce obráběné součásti.

Od firmy SECO je to například nástroj JS453120E3R300.0Z3-HEMI. Tento nástroj disponuje nestejnou roztečí zubů, která výrazně pomáhá eliminovat vznik vibrací. Nástroj

je vidět na obrázku 2.3, na němž je možné vidět odlehčenou stopku, která zabraňuje náhodnému dotyku obrobené plochy a nástroje.



Obr. 2.3 Nástroj Seco JS 453 [32].

Od firmy ISCAR je to nástroj ECA-H3-CF-C.

Jedná se o tříbřitý monolitní nástroj vyrobený ze slinutého karbidu, s proměnlivým úhlem sklonu šroubovice. Dále disponuje, tak jako předchozí nástroj, rovněž odlehčenou stopkou. Navíc je vybaven systémem vnitřního chlazení. Je vhodný pro hrubovací i dokončovací operace při obrábění hliníkových slitin. Výrobce uvádí výborné předpoklady pro eliminaci vibrací. Rozměry a tvar nástroje jsou patrné z obrázku 2.4.



Obr. 2.4 Nástroj ECA-H3-CF-C od firmy ISCAR [33].

Obrábění hliníkových slitin je problematické také z důvodu vysoké tepelné vodivosti, výrazného sklonu k adhezi na břit a nízké teploty tavení. Vzhledem k nízké teplotě tavení dochází k problematickému utváření třísky a k nalepování obráběného materiálu na břit. Tendence k nalepování stoupá s rostoucí zrnitostí karbidu wolframu (WC), obsahem kobaltu (Co) a s drsností povrchu nástroje [34]. Z těchto důvodů by bylo vhodné nástroj opatřit vhodným povlakem a porovnat silové zatížení nástroje u nepovlakovaného nástroje a u nástroje s povlakem. Příkladem povlaku vhodného pro tyto nástroje je povlak Balinit Hard Carbon od firmy Oerlikon Balzers. Tento povlak je vhodný pro obrábění hliníkových slitin s obsahem Si < 12 %. Výrobce při použití tohoto povlaku udává menší abrazivní i adhezní opotřebení, snížení koeficientu tření díky lepší drsnosti povrchu nástroje a vysokou teplotní stabilitu.

## 2.2 Obráběné součásti

### 2.2.1 Materiál

Pro první část experimentu byla vybrána sada šesti hliníkových slitin s různým chemickým složením, vlastnostmi a využitím. Každá z těchto slitin vykazuje jiné vlastnosti, a proto je také vhodná k jinému využití. Tabulka 9, která uvádí vlastnosti a použití těchto materiálů, je uvedena níže.

#### AW-2007

Tato slitina je vhodná pro výrobu strojních dílů, šroubů a nýtů. Tvoří krátké třísky, a tudíž je vhodná k opracování, pro výrobu závitů i pro vysokorychlostní obrábění. Má nízkou odolnost proti korozi a díky vysokému obsahu mědi není vhodná k svařování. Je nevhodná pro použití v potravinářství [35,36]. Chemické složení slitiny AW-2007 uvádí tabulka 2.

Tab. 2 Chemické složení slitiny AW-2007 [37].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Bi	Pb	Sn	Ti	ostatní		Al
												jednotl.	celkem	
0,8	0,8	3,3-4,6	0,5-1,0	0,4-1,8	0,1	0,2	0,8	0,2	0,8-1,5	0,2	0,2	0,1	0,3	zbytek

**AW-2030**

Tato slitina se využívá jako konstrukční materiál na mechanicky namáhané součásti, vysoká pevnost je docílena tepelným zpracováním. Slitina má špatnou odolnost proti atmosférické korozi a je dobře obrobitelná. Nemá vhodná pro použití v potravinářství [32]. Chemické složení slitiny AW-2030 uvádí tabulka 3.

Tab. 3 Chemické složení slitiny AW-2030 [37].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Bi	Pb	Ti	ostatní		Al
										jednotl.	celkem	
0,8	0,7	3,3-4,5	0,2-1,0	0,5-1,3	0,1	0,5	0,2	0,8-1,5	0,2	0,1	0,3	zbytek

**AW-5083**

Tato slitina je odolná mořské vodě, má vysokou odolnost vůči korozi, je vhodná ke svařování. Má průměrnou pevnost a průměrné vlastnosti pro eloxování [35]. Používá se na skladovací nádrže, tlakové nádoby a námořní plavidla [36]. Chemické složení slitiny AW-5083 uvádí tabulka 4.

Tab. 4 Chemické složení slitiny AW-5083 [37].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ostatní		Al
								jednotl.	celkem	
0,4	0,4	0,1	0,4-1,0	4,0-4,9	0,05-0,25	0,25	0,15	0,05	0,15	zbytek

**AW-6060**

Tato slitina se využívá pro všeobecné účely. Vyrábí se z ní celá řada různých polotovarů. Je vhodná na středně namáhané konstrukce letadel a vozidel, pro výrobu součástí pro jemnou mechaniku a optiku. Je vhodná ke svařování i k eloxování [36]. Má vysokou odolnost proti korozi [35]. Chemické složení slitiny AW-6060 uvádí tabulka 5, mechanické vlastnosti této slitiny tabulka 6.

Tab. 5 Chemické složení slitiny AW-6060 [37].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ostatní		Al
								jednotl.	celkem	
0,3-0,6	0,1-0,3	0,1	0,1	0,35-0,6	0,05	0,8	0,2	0,1	0,3	zbytek

Tab. 6 Mechanické vlastnosti slitiny AW-6060 [37].

Stav	R <sub>p</sub> 0,2 [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>50</sub> [MPa]	HB
T4	60	120	14	-

**AW-6082**

Tato slitina je vhodná k použití jako konstrukční i dekorační materiál. Využívá se na středně namáhané konstrukce, u nichž se vyžaduje chemická stálost. Je dobře leštitelná a má dobrou odolnost proti korozi. Používá se na výrobu dílů pro letadla a vozidla, pro jemnou mechaniku, v potravinářském a ve stavebním průmyslu [36]. Má vysokou pevnost, je vhodná ke svařování i k eloxování [35]. Chemické složení slitiny AW-6082 uvádí tabulka 7.

Tab. 7 Chemické složení slitiny AW-6082 [37].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ostatní		Al
								jednotl.	celkem	
0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1	0,05	0,15	zbytek

**AW-7075**

Tato slitina má oproti ostatním slitinám hliníku výrazně lepší mechanické vlastnosti. Je označována jako letecký dural. Využívá se na vysoce namáhané konstrukce, ve zbrojním průmyslu a pro výrobu strojních součástí. Při opracování tvoří krátké třísky a má velmi vysokou pevnost. Není příliš odolná vůči korozi a není vhodná ke svařování ani k eloxování [35,36]. Chemické složení této slitiny uvádí tabulka 8.

Tab. 8 Chemické složení slitiny AW-7075 [37].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr+Ti	ostatní		Al
								jednotl.	celkem	
0,4	0,5	1,2-2,0	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,25	0,05	0,15	zbytek

Tab. 9 Vlastnosti vybraných slitin hliníku [38].

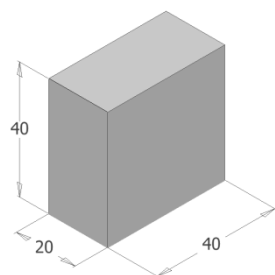
Slitina	Eloxovatelnost	Korozní odolnost	Svařitelnost	Třískové obrábění	Použití
AW-2007	3-4	4-5	5	1	B, C
AW-2030	3-4	4-5	5	1	B, C
AW-5083	3	2-3	2-3	2	B, E
AW-6060	1	2	2	3	C, E, F
AW-6082	2-3	2	2	3-4	B, C, E, F
AW-7075	4-5	5	4-5	2-3	B, C, E, F

A – elektrotechnika, B – strojní součásti, vhodné k obrábění, C – konstrukce, D – stavba lodí, E – tváření za tepla a za studena (kování), F – všeobecné použití

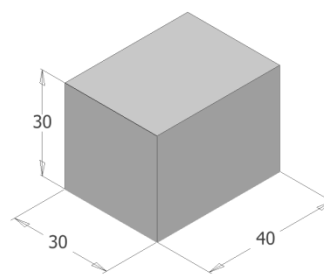
V druhé části experimentu se frézuje součást vyrobená ze slitiny AW-6060, jejíž použití a vlastnosti jsou uvedeny výše.

**2.2.2 Tvar součásti**

V první části experimentu se obrábí sada čtyř vzorků o rozměrech 40×40×20 mm a dvou o rozměrech 40×30×30 mm. Každý z těchto vzorků je z jiného materiálu a na každém z těchto vzorků byly provedeny tři řezy o délce 40 mm. Rozměry a tvar obrobků jsou patrné z obrázku 2.5.



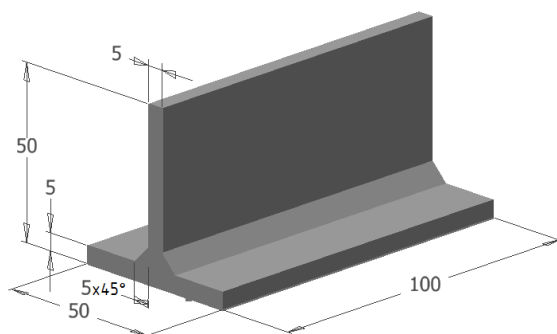
a)



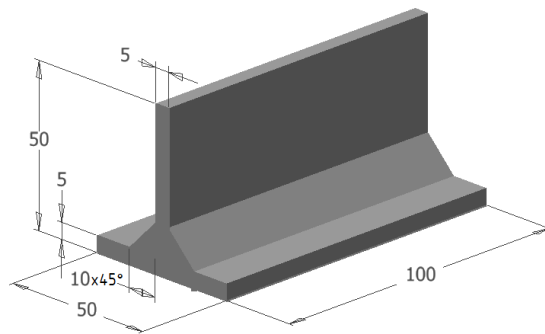
b)

Obr. 2.5 Rozměry obráběných vzorků a) 40×40×20 mm, b) 40×30×30 mm.

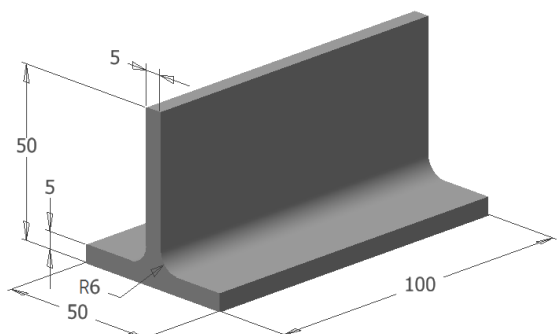
V druhé části experimentu se obrábí celkem čtyři součásti. Jde o různě modifikovaný T profil o tloušťce stěny 5 mm a délce 100 mm. Profil je modifikován vnitřním rádiusem o velikosti 6 a 10 mm a úkosem o velikosti  $5 \times 45^\circ$  a  $10 \times 45^\circ$ . Pro snadnější identifikaci jednotlivých součástí budou dále v práci uváděny jako R6, R10, Z5 a Z10. Tvary obráběných součástí jsou zobrazeny na obrázku 2.6.



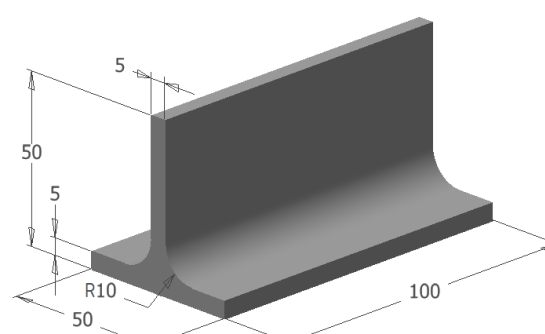
a)



b)



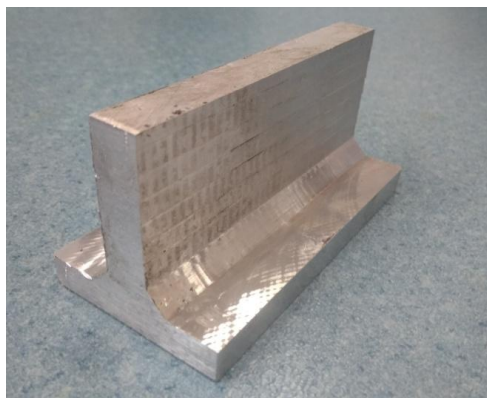
c)



d)

Obr. 2.6 Obráběné součásti a jejich rozměry a) zkosení 5 mm, b) zkosení 10 mm, c) rádius 6 mm a d) rádius 10 mm.

Obráběné tenkostěnné součásti byly připraveny v prostorách dílny Ústavu Strojírenské technologie. Polotovarem byla plochá tyč o rozměrech 50x60 mm z výše uvedené hliníkové slitiny. Polotovár byl nařezán na délku 100 mm, vyhrubován a následně dokončen na finální rozměr. Jedna z vyhrubovaných součástí s přídavkem na dokončení je vidět na obrázku číslo 2.7.



Obr. 2.7 Vyhrubovaná součást.

### 2.3 Obráběcí stroj

Pro realizaci experimentu bylo vybráno obráběcí centrum MCV 1210 od firmy Tajmac ZPS (viz. Obrázek 2.8). Tento stroj je součástí vybavení dílny Ústavu Strojírenské Technologie na FSI VUT v Brně. Stroj je ovládán řídicím systémem Sinumerik 840D. Důležitá technická data o stroji shrnuje Tabulka 10.

Tabulka 10 [39].

Pracovní pojezd	osa X [mm]	1 000
	osa Y [mm]	800
	osa Z [mm]	600
Posuvy v osách X, Y, Z	Pracovní posuv [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	20
	Rychloposuv [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	40
	Maximální zrychlení os [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	0–18 000
Pracovní stůl	Pracovní plocha [mm]	1 200×1 000
	Maximální zatížení nástroje [kg]	3 000
Vřeteno	Typ	Weiss 176 024_800
	Rozsah otáček [ $\text{min}^{-1}$ ]	0-15 000
	Upínací kužel	HSK-A 63



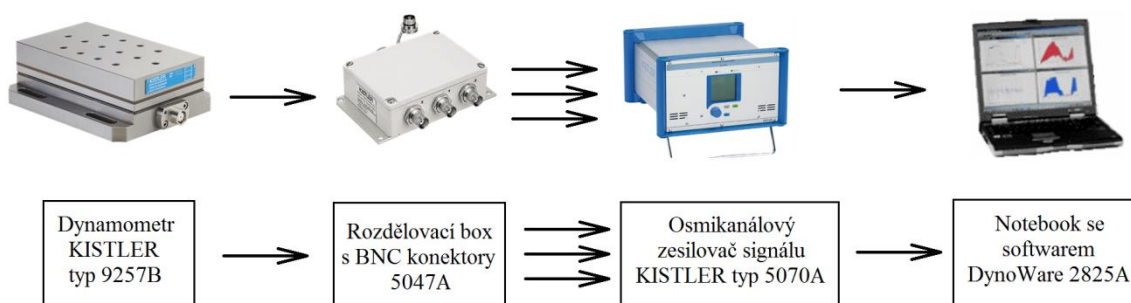
Obrázek 2.8 Obráběcí centrum MCV 1210 [40].

## 2.4 Měřicí zařízení

Měřicí sestava se skládá z následujících zařízení:

- tříložkový dynamometr Kistler 9257B,
- propojovací kabel 1685B5,
- prodlužovací kabel 1688B5,
- rozdělovací box s BNC konektory 5407A,
- BNC - BNC kabel 1601B2,
- osmikanálový zesilovač signálu Kistler typ 5070A,
- propojovací kabel k A/D převodníkům,
- řídicí kabel RS-232,
- A/D převodník pro notebook s redukčním kabelem,
- notebook s nainstalovaným softwarem DynoWare.

Schéma zapojení měřicího zařízení popisuje obrázek 2.9.



Obr. 2.9 Schéma zapojení měřicího zařízení [41],[42].

Pro měření rozměrů součástí před a po testovaném obrábění byla využita měřicí sonda Renishaw OMP 400. Dotyková sonda ve výrobním procesu přináší řadu výhod. Pomocí ní je možné provádět automatizované měření přesnosti nastavení obrobku vzhledem k souřadnému systému stroje a také rychlé a přesné proměřování obráběných součástí mezi jednotlivými operacemi za účelem snížení zmetkovitosti. Díky ní je také velmi snadné automatizované měření ohrubovaných i dokončených víceosých prvků [38]. Měřicí sondu ukazuje obrázek 2.10.



Obr. 2.10 Měřicí sonda Renishaw OMP 400 [43].

## 2.5 Řezné podmínky a technologie frézování

Řezné podmínky byly stanoveny v rozmezí doporučení výrobce nástroje a jsou shrnuty v tabulce číslo 11. Řezné podmínky byly předem vyzkoušeny z důvodu zjištění, zda neleží v oblasti vzniku samobuzeného kmitání konkrétní soustavy stroj-nástroj-obrobek. V případě vzniku chvění, které se nejčastěji projevuje nepříjemným akustickým doprovodem, by bylo nutné snížit nebo zvýšit otáčky tak, aby ležely mimo oblast vzniku samobuzeného kmitání, případně snížit průřez třísky snížením velikosti  $a_p$  nebo  $f_z$ .

Výpočet řezné a posuvové rychlosti byl proveden podle známých vztahů:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 12 \cdot 12500}{1000} = 471 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

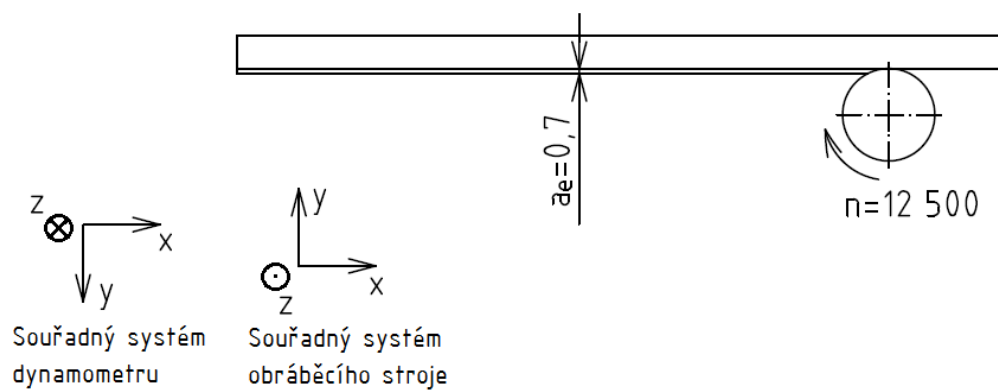
$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = 0,11 \cdot 3 \cdot 12500 = 4125 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

Tabulka 11 Řezné podmínky.

$v_c$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$f_z$ [mm]	$v_f$ [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	$a_p$ [mm]	$a_e$ [mm]
471	12500	0,11	4125	10	0,7

Pro obrábění tenkostěnných součástí je obecně doporučováno sousledné frézování, a to z několika důvodů. Při sousledném frézování je smysl rotace nástroje shodný se směrem posuvu obrobku. Tloušťka třísky je maximální v okamžiku vniknutí zubu do obrobku. Obrobená plocha vzniká, když zub vychází ze záběru. Při sousledném frézování nedochází k tak výrazným změnám směru výsledné působící síly, díky tomu je obrobek méně náchylný na vznik vibrací. Obvykle se dosahuje menší drsnosti obrobeného povrchu, je menší nebezpečí vzniku nárůstku a je potřeba menší řezný výkon [6]. Řezné síly mají snahu přitahovat obrobek k nástroji a tím udržují zub v řezu. Z těchto důvodů se jako jednoznačně lepší variantou jeví sousledné frézování. Schéma frézování a souřadné systémy stroje a dynamometru ilustruje obrázek 2.11.

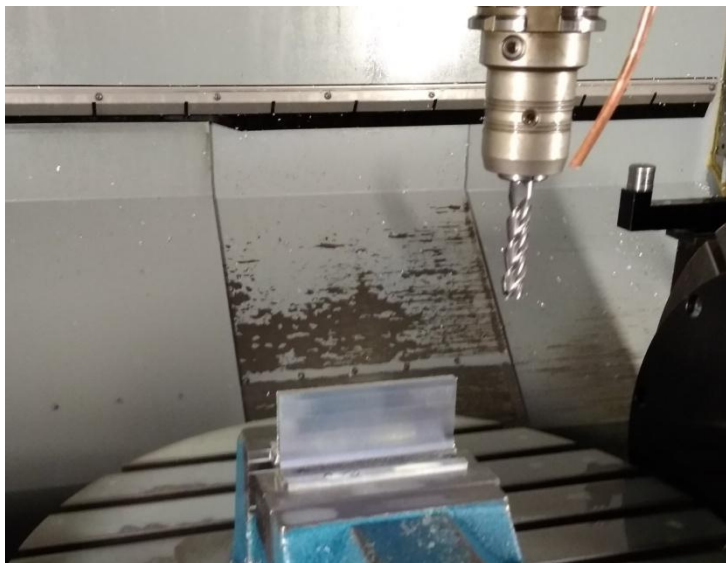




Obr. 2.11 Schéma frézování.

### 3 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ SILOVÉHO ZATÍŽENÍ

Praktické měření probíhalo v dílnách Ústavu strojírenské technologie. Uspořádání experimentálního měření je znázorněno na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Uspořádání experimentálního měření.

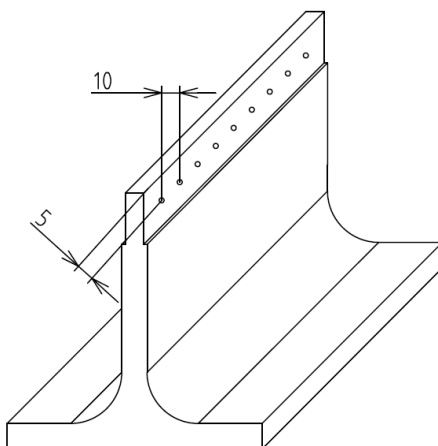
Pro měření silového zatížení bylo nutné vhodně nastavit vzorkovací frekvenci, tj. počet hodnot, které měřicí soustava zaznamená za jednu sekundu. Příliš velká vzorkovací frekvence způsobí naměření velkého počtu hodnot, které mohou být pro měření nadbytečné. Příliš malá vzorkovací frekvence naopak způsobuje nepřesné a zkreslené výsledky měření silového zatížení. Snahou bylo nastavit vzorkovací frekvenci tak, aby došlo při každém záběru zubu k zaznamenání minimálně tří hodnot silového zatížení. Čím menší radiální záběr  $a_e$  a čím větší otáčky  $n$ , tím větší vzorkovací frekvenci je nutné nastavit. Při výpočtu vhodné vzorkovací frekvence bylo nutné mírně snížit řezné podmínky, aby potřebná vzorkovací frekvence byla nižší než maximální nastavitelná vzorkovací frekvence měřicí aparatury.

#### 3.1 Experimentální měření – 1. část

V první části experimentu se provedlo měření silového zatížení na obrobku tvaru hranolu o rozměrech uvedených výše. Toto měření probíhalo na sadě vzorků, z nichž každý byl z jiného materiálu, ve výsledku je tedy možné porovnat silové zatížení působící na nástroj v závislosti na konkrétním obráběném materiálu. Měření probíhalo při stejných nastavených řezných podmínkách, jako ve druhé části experimentu. Na každém vzorku byly provedeny a změřeny tři zkušební řezy.

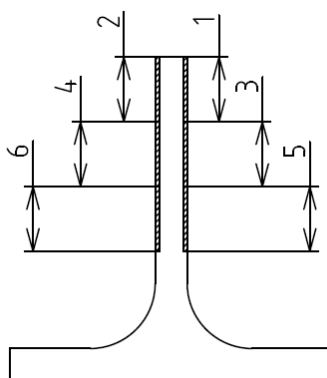
#### 3.2 Experimentální měření – 2. část

Ve druhé části experimentu bylo provedeno měření silového zatížení vzniklého působením nástroje na obráběnou součást. Následně bylo provedeno měření odchylek od požadovaného obrobeného rozměru. Po upnutí obráběné součásti do svěráku se pomocí dotykové sondy provedlo proměření připravené součásti v celkem devíti bodech ve směru osy  $x$  a ve třech hladinách ve směru osy  $z$ . Polohy bodů pro měření součásti jsou patrné z obrázku číslo 3.2.



Obr. 3.2 Polohy bodů pro měření součásti.

V další fázi se pokračovalo obráběním. Za řezných podmínek, které jsou uvedeny výše, se provedl vždy jeden průjezd z obou stran součásti. Po provedení průjezdu probíhalo znovu měření součásti, tentokrát ovšem pouze v zetové souřadnici, ve které byl proveden řez. Součást byla takto proměřena z obou stran a hodnoty byly zaznamenány. Následně se pokračovalo obráběním dalšího řezu z obou stran a měřením součásti z obou stran. Pořadí provedených řezů je zjevné z obrázku číslo 3.3.

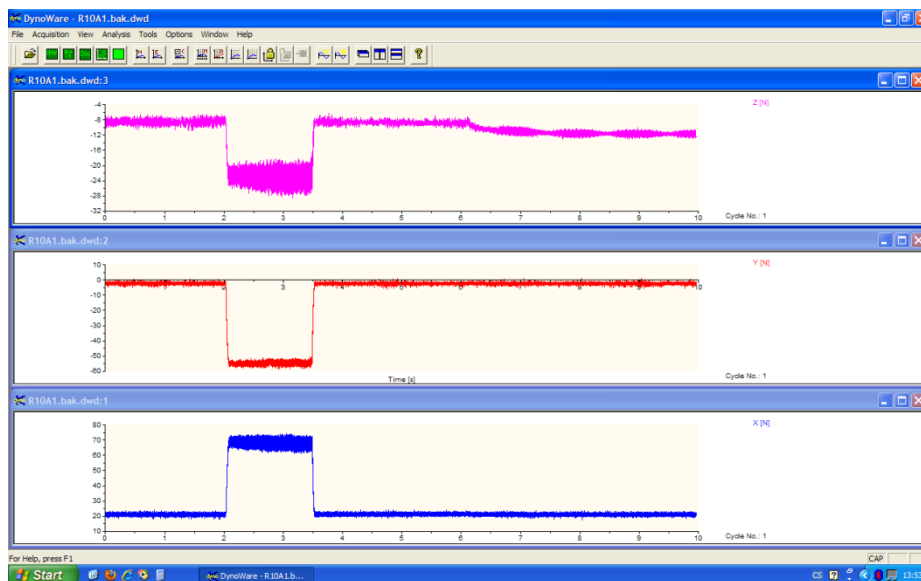


Obr. 3.3 Pořadí jednotlivých řezů.

Během obrábění každého z řezů bylo pomocí uvedené aparatury zaznamenáváno silové zatížení, kterým působí nástroj na obráběnou součást. Výsledkem tohoto silového zatížení je elastická deformace součásti během obrábění. Dochází k ohnutí tenkého žebra a reálná radiální hloubka řezu je tedy menší než nastavená. Proměřením součásti před a po provedení řezu je možné zjistit odchylku od požadovaného rozměru a tím velikost vychýlení vzniklého vlivem působení silového zatížení.

## 4 VYHODNOCENÍ SILOVÉHO ZÁZNAMU

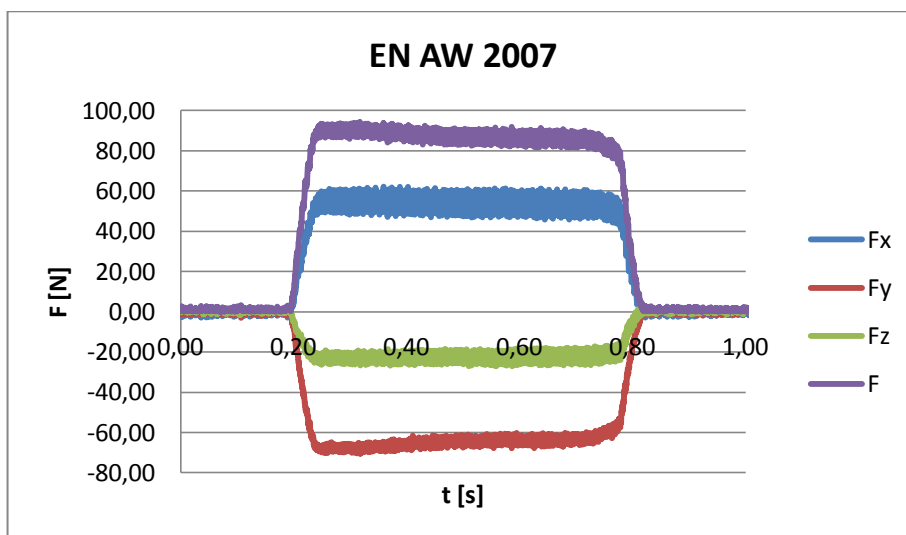
Z naměřených dat byly v programu DynoWare odříznuty nadbytečné hodnoty a poté byla data exportována do formátu txt a převedena do tabulkového procesoru Excel. Naměřené silové zatížení zobrazené v programu DynoWare je zobrazeno na obrázku 4.1.



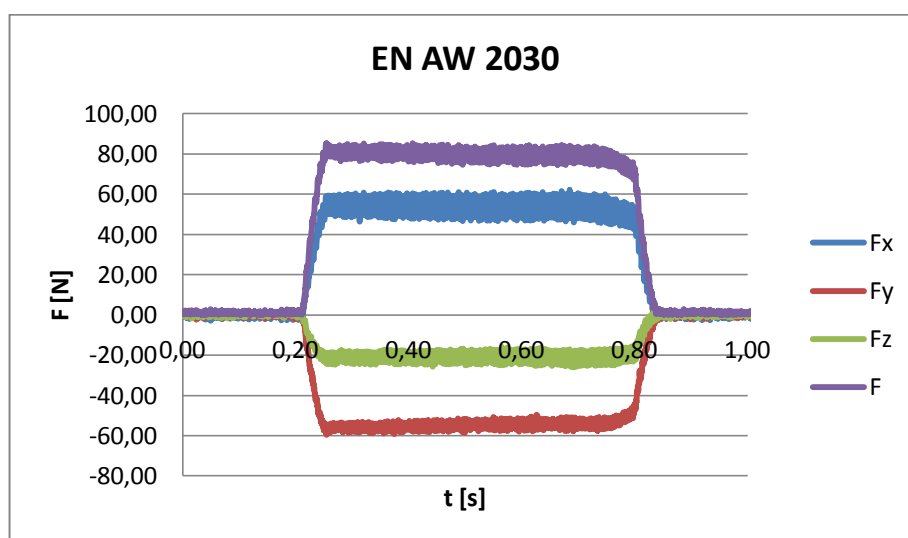
Obr. 4.1 Změřené silové zatížení v programu DynoWare.

### 4.1 Vyhodnocení 1. části experimentu

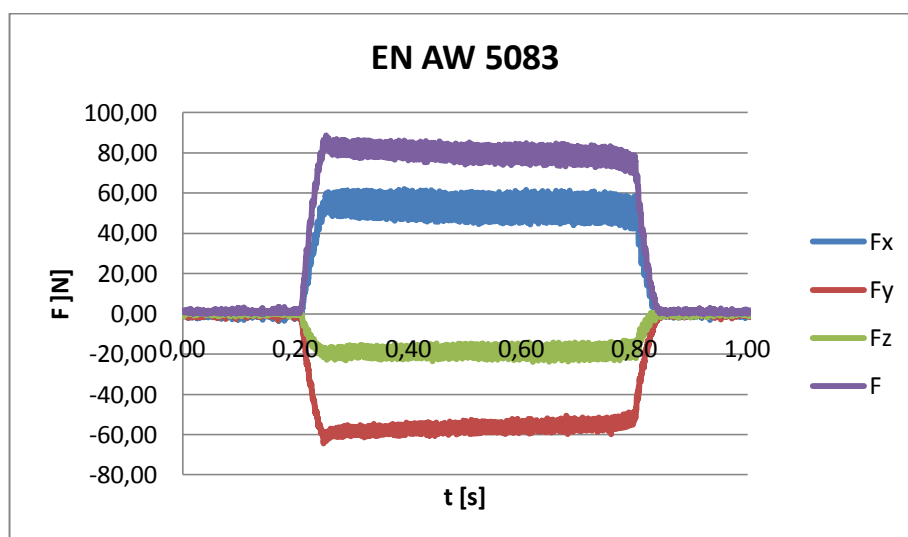
Výsledkem první části experimentů jsou grafické závislosti velikosti složek síly a výsledné síly na čase. Tyto závislosti jsou vidět na obrázcích 4.2-4.7. Závislosti ukazují průběh silového zatížení u druhého ze tří měřených průjezdů nástroje. Z grafů je možné vidět, že obráběný materiál značně ovlivňuje velikost výsledného silového zatížení. Ačkoli všechny řezné podmínky byly neměnné, výsledkem jsou různé hodnoty silového zatížení u jednotlivých materiálů.



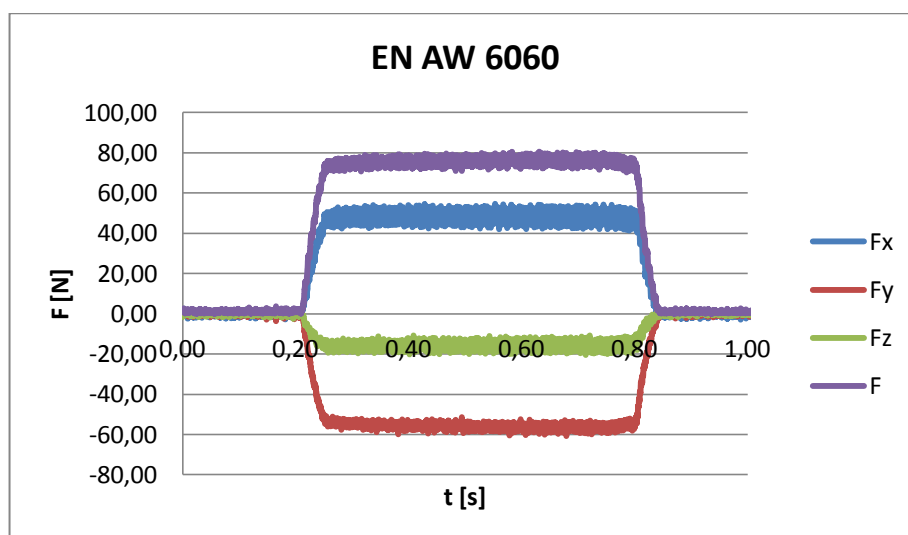
Obr. 4.2 Závislost silového zatížení na čase pro slitinu EN AW 2007.



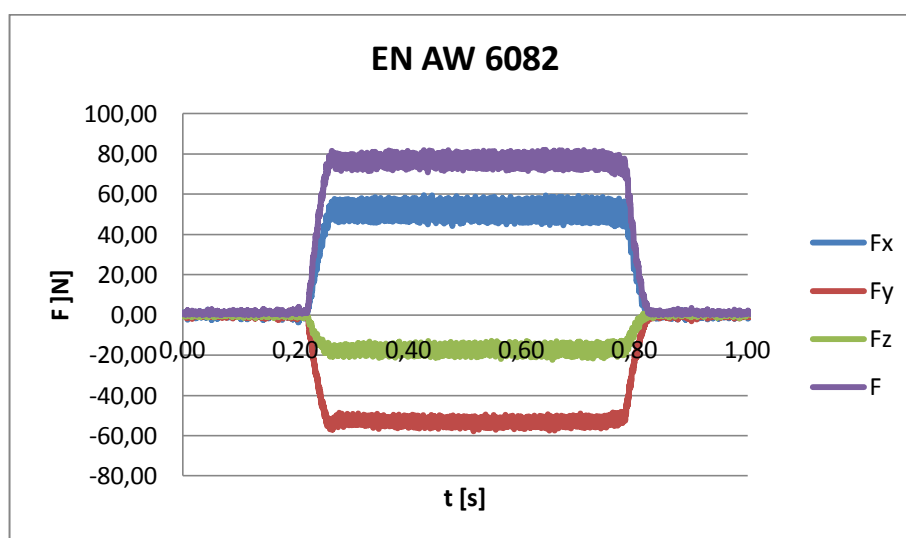
Obr. 4.3 Závislost silového zatížení na čase pro slitinu EN AW 2030.



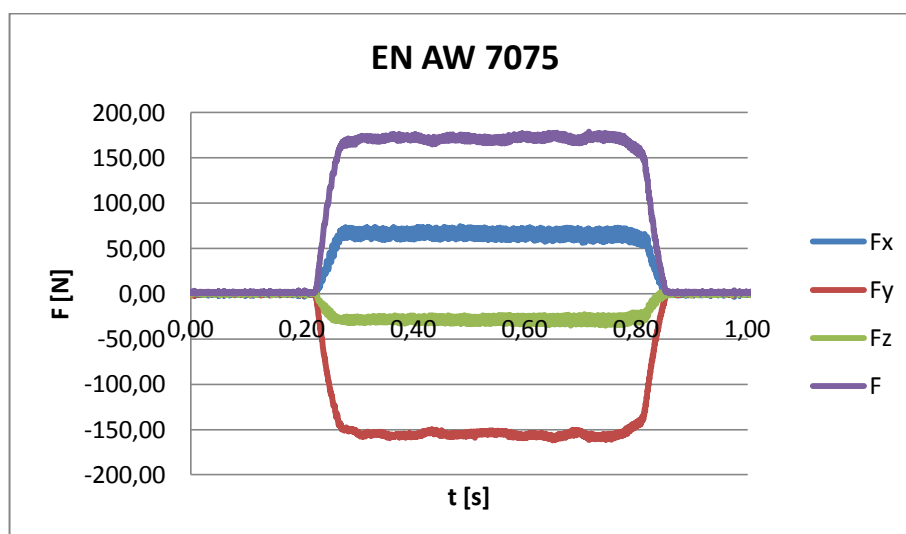
Obr. 4.4 Závislost silového zatížení na čase pro slitinu EN AW 5083.



Obr. 4.5 Závislost silového zatížení na čase pro slitinu EN AW 6060.



Obr. 4.6 Závislost silového zatížení na čase pro slitinu EN AW 6082.



Obr. 4.7 Závislost silového zatížení na čase pro slitinu EN AW 7075.

Tabulka 12 uvádí hodnoty výsledné síly získané jako aritmetický průměr vyfiltrovaných hodnot průběhu silového zatížení. Uvedená hodnota síly byla spočtena jako aritmetický průměr ze tří měřených průjezdů u každé slitiny.

Tabulka 12

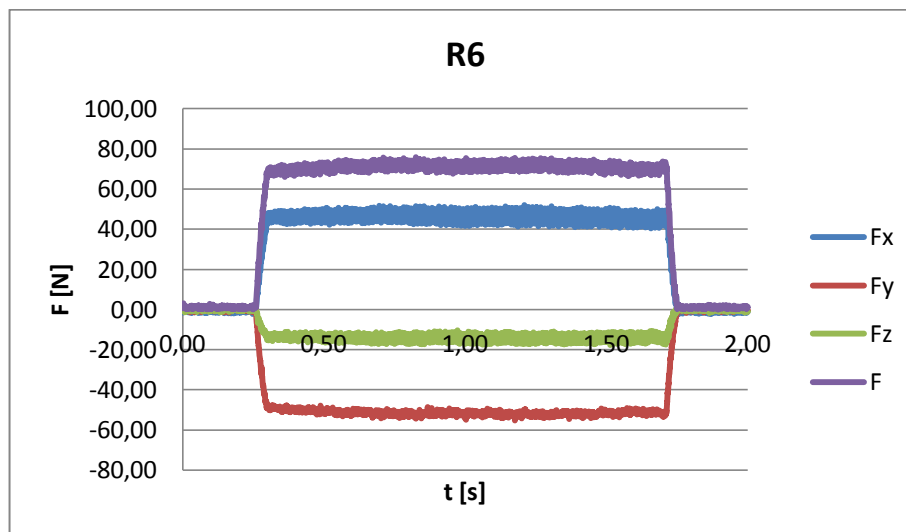
Slitina	Výsledná síla F [N]
EN AW 2007	89,59
EN AW 2030	79,60
EN AW 5083	78,66
EN AW 6060	77,87
EN AW 6082	79,52
EN AW 7075	169,96

U prvních pěti obráběných slitin je výsledná hodnota síly téměř stejná s odchylkou maximálně 10 %. U slitiny EN AW 7075 převyšuje hodnota celkové síly ostatní slitiny více než dvojnásobně.

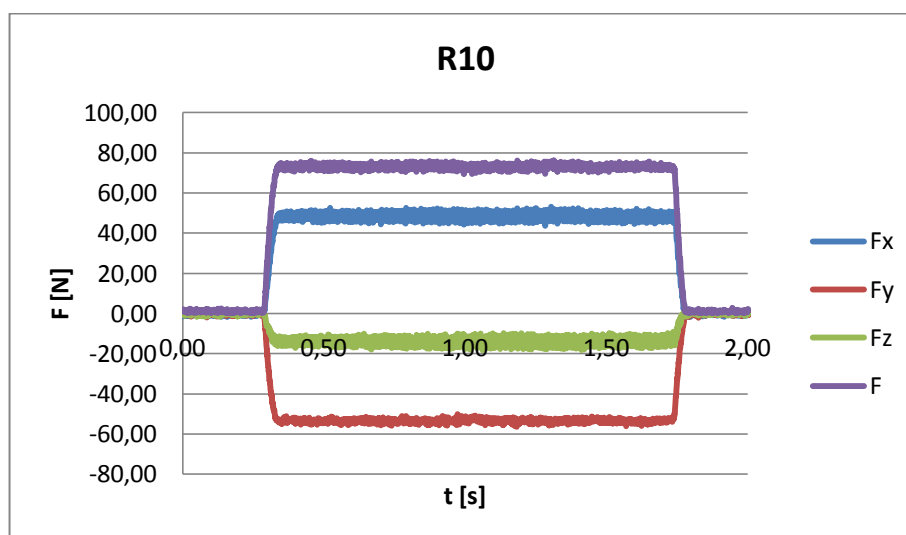
## 4.2 Vyhodnocení 2. části experimentu

### 4.2.1 Vyhodnocení silového zatížení

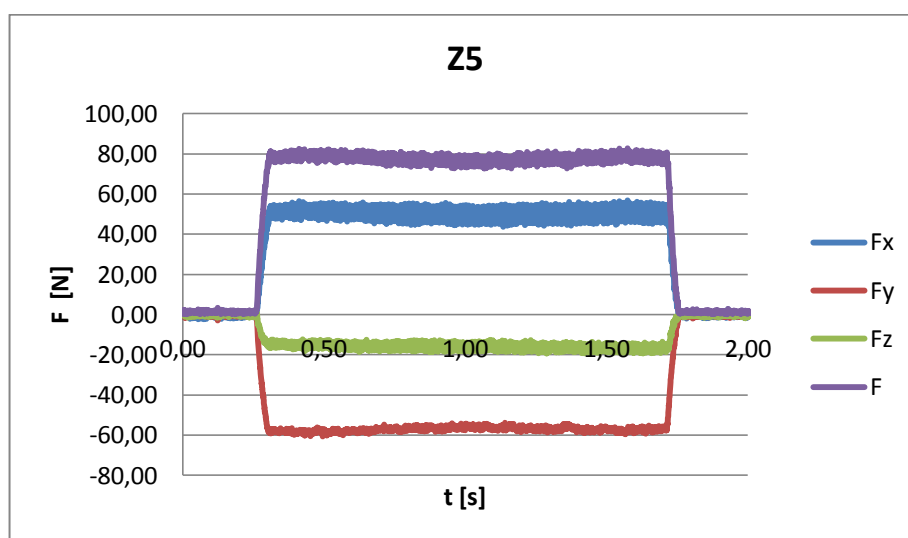
Časovou závislost jednotlivých složek sil a výsledné síly působící při obrábění tenkostěnných součástí je možné vidět na obrázcích 4.8 – 4.11. Grafy znázorňují silové zatížení prvního ze tří průjezdů u dané součásti.



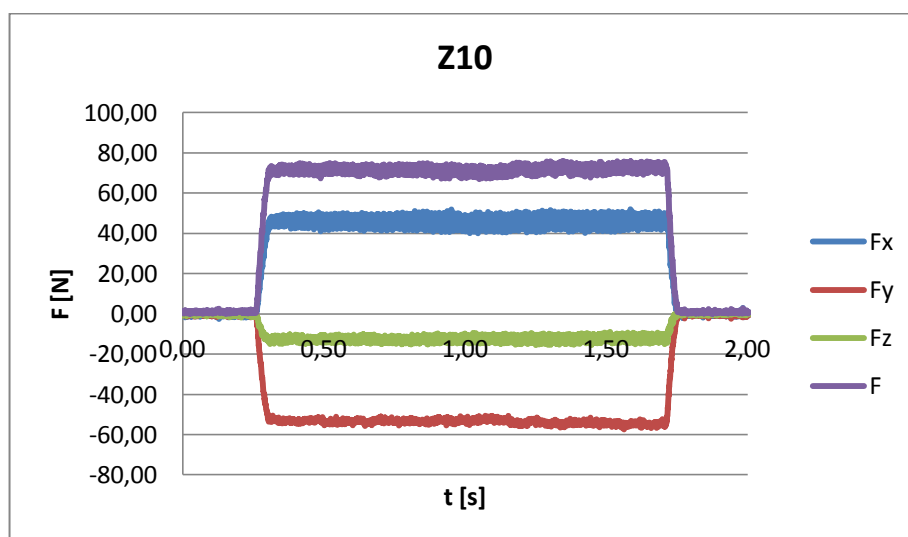
Obr. 4.8 Časová závislost silového zatížení u součásti R6, první průjezd.



Obr. 4.9 Časová závislost silového zatížení u součásti R10, první průjezd.



Obr. 4.10 Časová závislost silového zatížení u součásti Z5, první průjezd.



Obr. 4.11 Časová závislost silového zatížení u součásti Z10, první průjezd.

Průběh silového zatížení pro jednotlivé součásti se téměř nemění. Výsledná síla, kterou působí nástroj na obráběnou součást, je dána řadou parametrů, mezi které patří posuv na zub  $f_z$ , průměr nástroje  $R$ , měrná řezná síla pro tloušťku třísky 1 mm  $k_{cl}$  a úhel posuvového pohybu  $\varphi$ . Všechny tyto parametry byly však pro dané obráběné součásti stejné a proto je i naměřené výsledné silové zatížení prakticky neměnné. Použití radiusu nebo zkosení, ani jejich velikost nemá žádný vliv na velikost a průběh silového zatížení. Odchylka velikostí hodnot silových složek a celkové síly u součásti Z5 je pravděpodobně způsobena příliš velkou upínací silou a je popsána níže.

#### 4.2.2 Vyhodnocení vychýlení součásti

Jako důsledek tohoto silového zatížení vzniká deformace. Tato deformace vzniká jednak na obráběné součásti, ale také i na obráběcím nástroji. Součtem těchto dvou deformací je celková nepřesnost obrábění, která se projeví jako odchylka od požadovaného dokončeného rozměru. Vzhledem ke skutečnosti, že obráběným materiálem je slitina hliníku, jejíž Youngův modul pružnosti je roven přibližně 70 GPa, zatímco materiálem, z něhož je vyroben obráběcí nástroj, je slinutý karbid o Youngově modulu pružnosti



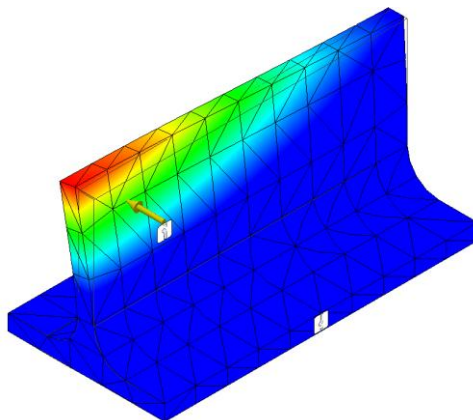
přibližně 450÷650 GPa, je možné předpokládat, že deformace nástroje bude zanedbatelná vzhledem k velikosti deformace obráběné součásti. Z tohoto důvodu při měření deformací není na vychýlení nástroje brán zřetel a uvažuje se pouze deformace obráběné součásti.

Ze záznamu hodnot silového zatížení byly v programu Microsoft Excel vyfiltrovány maximální hodnoty silového zatížení ve směru osy  $y$ . Následně byly pro jednotlivé součásti a pro jednotlivé zetové souřadnice stanoveny výsledné síly  $F_y$ . Tyto hodnoty byly stanoveny jako aritmetický průměr vyfiltrovaných hodnot silového zatížení ve směru osy  $y$ . Pro každou zetovou souřadnici pak byla stanovena průměrná zatěžující síla jako aritmetický průměr hodnot  $F_y$  u každé ze čtyř součástí. Výsledné hodnoty zatěžující síly  $F_y$  jsou pro jednotlivé zetové souřadnice shrnuty v tabulce 13.

Tabulka 13 Hodnoty zatěžující síly  $F_y$  pro jednotlivé zetové souřadnice.

Z [mm]	-5	-15	-25
$F_y$ [N]	55,0	55,7	57,5

Touto silou  $F_y$  byly následně zatěžovány všechny zkoumané součásti v modulu Pevnostní analýza v programu Autodesk Inventor 2017. Příklad zatížení zobrazuje obrázek 4.12. Součásti byly zatěžovány v bodech dle obr. 3.2. Jako materiál součásti byla zvolena slitina hliníku AW 6061, která má velmi podobné mechanické vlastnosti, jako reálně obráběná součást AW 6060. Pevnými vazbami byly při simulaci zvoleny dvě protilehlé plochy, za které je součást upnuta i ve svěráku při obrábění.

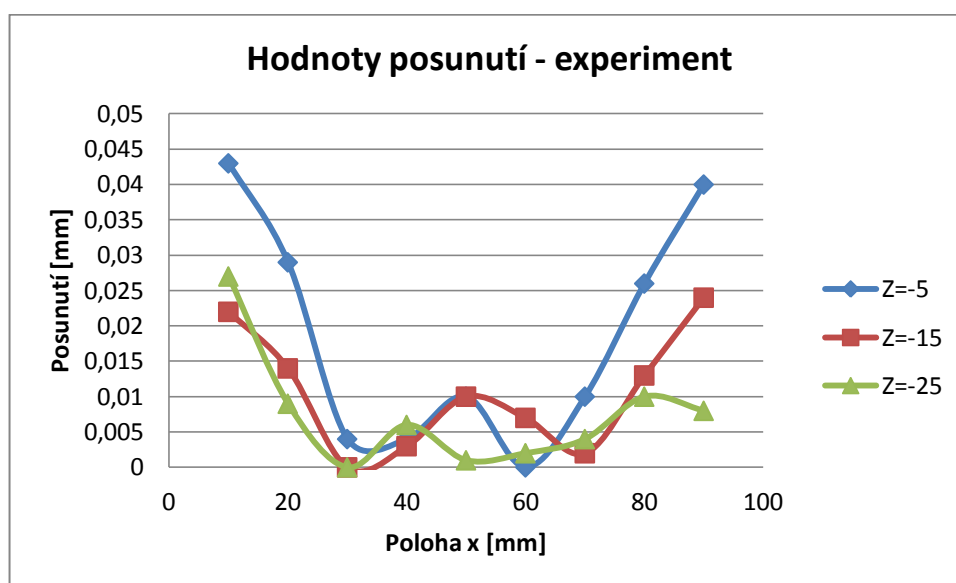


Obr. 4.12 Součást zatížená v programu Autodesk Inventor 2017.

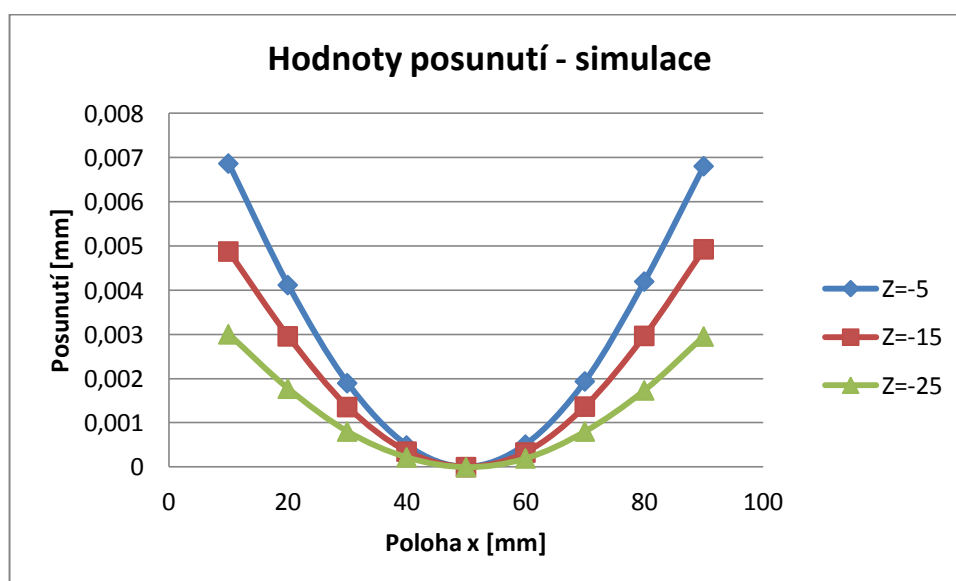
Při experimentálním testování byla po provedení každého průjezdu součást proměřena pomocí dotykové sondy a tím byla zjištěna odchylka od požadovaného rozměru. Jedním z předpokladů bylo, že vzniklé vychýlení bude mít rozdílné hodnoty v závislosti na typu použitého zpevňujícího prvku (rádius, zkosení), jeho rozměru a také, že hodnoty vychýlení se budou lišit v závislosti na vzdálenosti působící síly od místa vetknutí. Dalším předpokladem bylo, že hodnoty vychýlení budou u okrajů součásti vlivem menší tuhosti součásti dosahovat vyšších hodnot.

Cílem této práce není zjišťování absolutní výchylny tenkostěnné součásti při obrábění, ale rozdíl mezi největším a nejmenším vychýlením součásti v závislosti na poloze působícího zatížení po délce součásti. Z tohoto důvodu byly při vyhodnocení hodnoty vychýlení posunuty tak, že minimální hodnota odpovídá nule.

Porovnání hodnot naměřených experimentálně a hodnot získaných pomocí simulace pro jednotlivé zkoumané součásti je možné vidět na obrázcích 4.13-4.20.

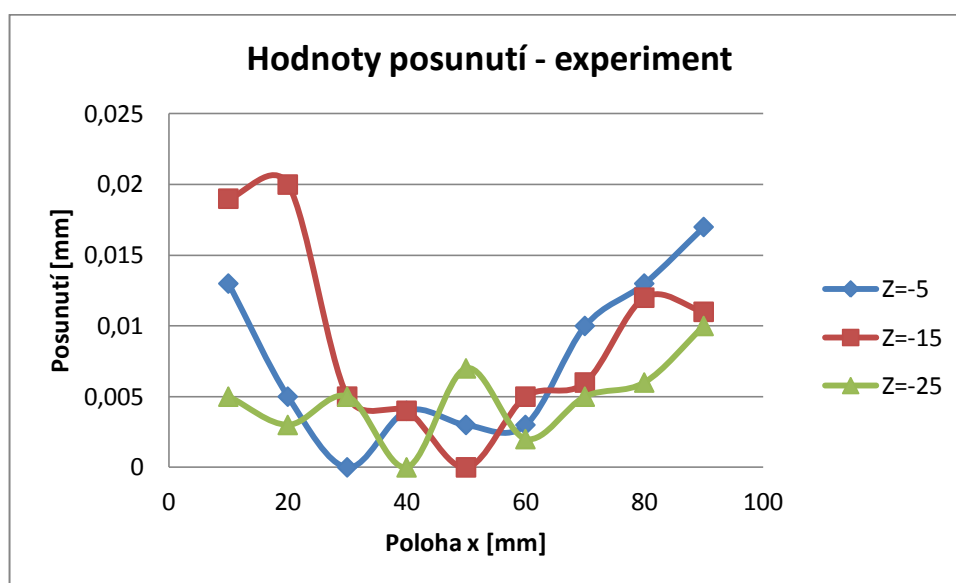


Obr. 4.13 Změřené hodnoty vychýlení, součást R6.

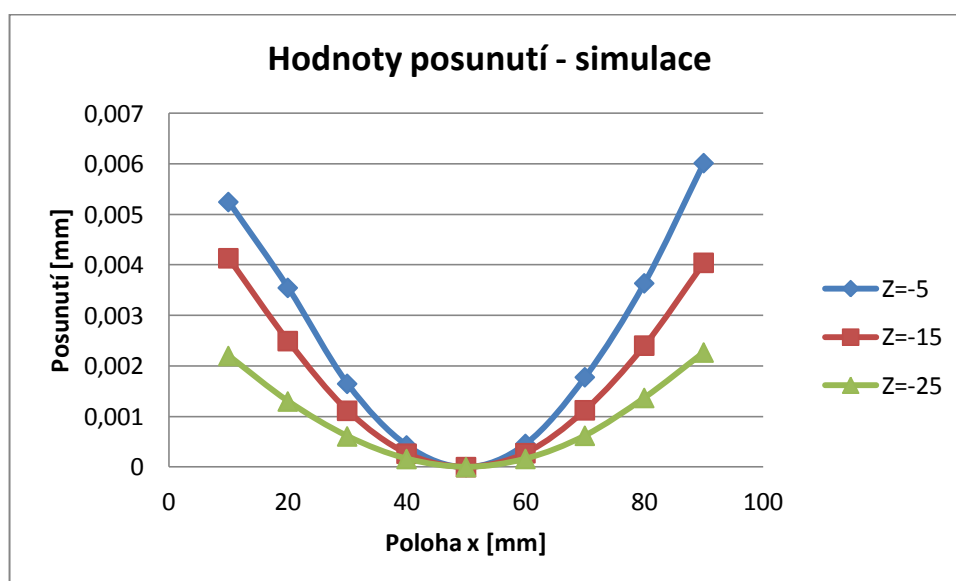


Obr. 4.14 Hodnoty vychýlení získané z pevnostní analýzy, součást R6.

Naměřené hodnoty a hodnoty získané simulací v programu Inventor jsou u součásti R6 rozdílné. Rozdíl největší a nejmenší hodnoty u experimentálně naměřených hodnot činí 0,043 mm, u simulovaných hodnot je to přibližně 0,007. Měření však (s výjimkou jednoho bodu) potvrzuje předpoklad, že deformace je u okrajů součásti největší, zatímco uprostřed je nejmenší.

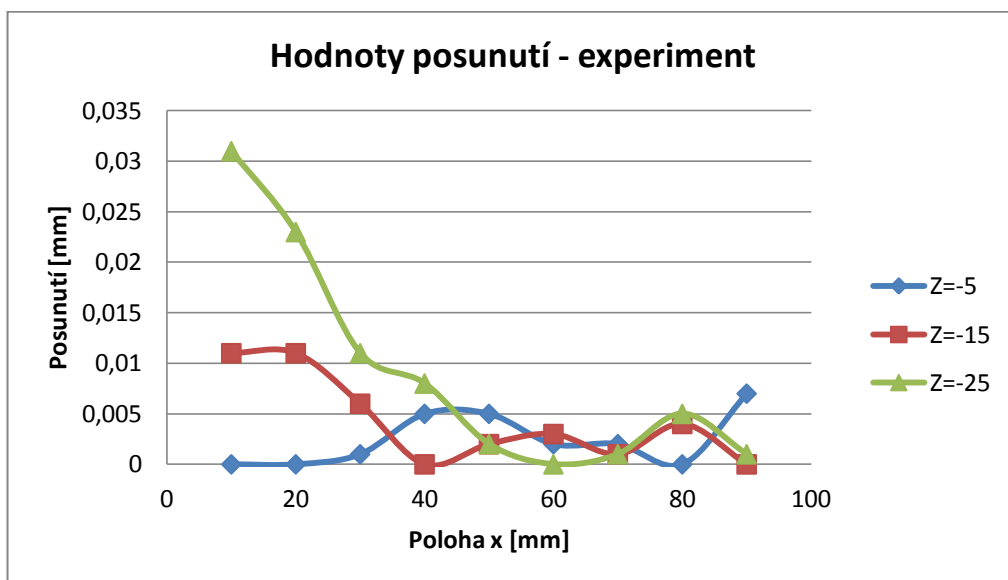


Obr. 4.15 Změřené hodnoty vychýlení, součást R10.

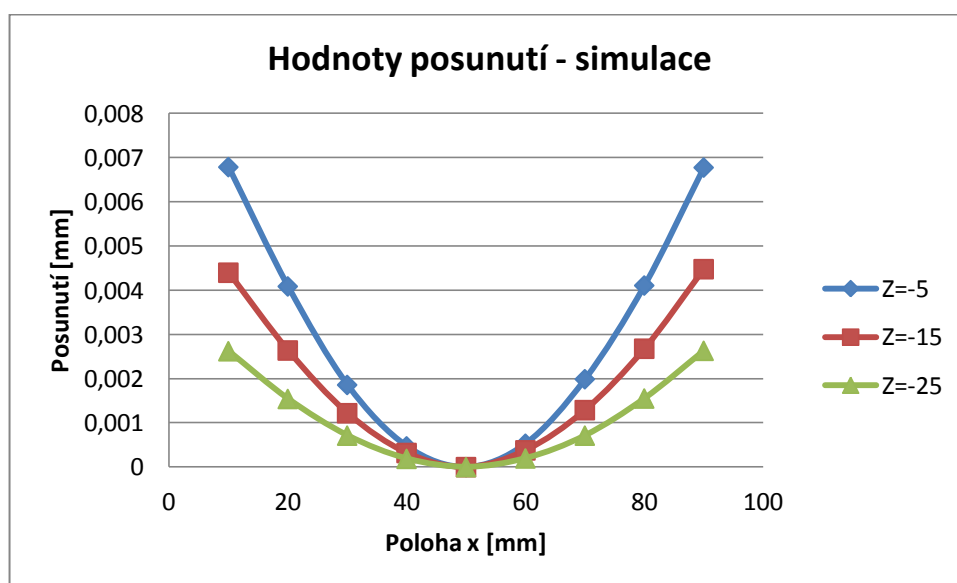


Obr. 4.16 Hodnoty vychýlení získané z pevnostní analýzy, součást R10.

U součásti R10 je rozdíl největší a nejmenší deformace u experimentálně naměřených hodnot roven 0,017 mm. U hodnot získaných simulací v programu Inventor je to 0,006 mm. Experimentálně naměřené vychýlení součásti značně kolísá podél celé délky součásti. Je zde však patrný trend vyšších vychýlení v krajních částech součásti.

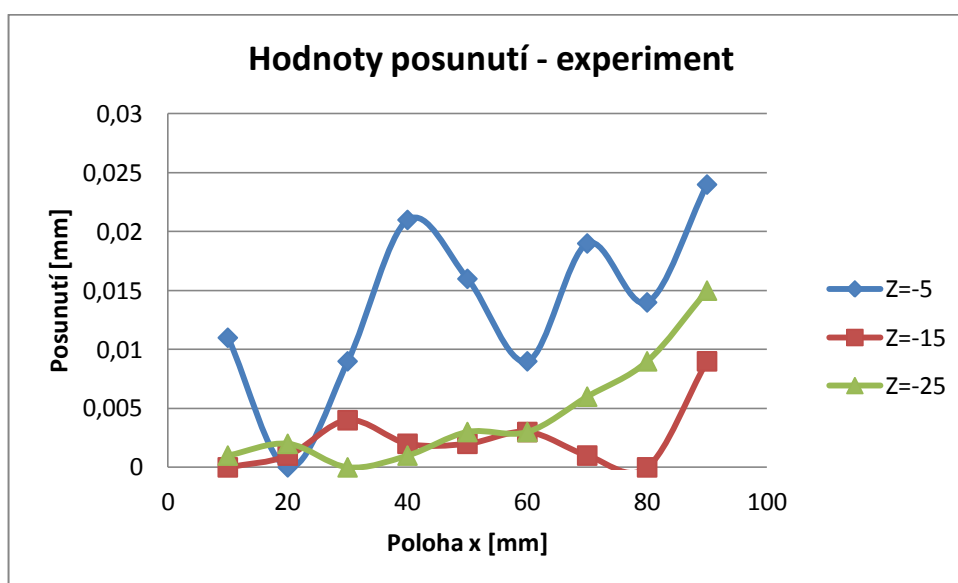


Obr. 4.17 Změřené hodnoty vychýlení, součást Z5.

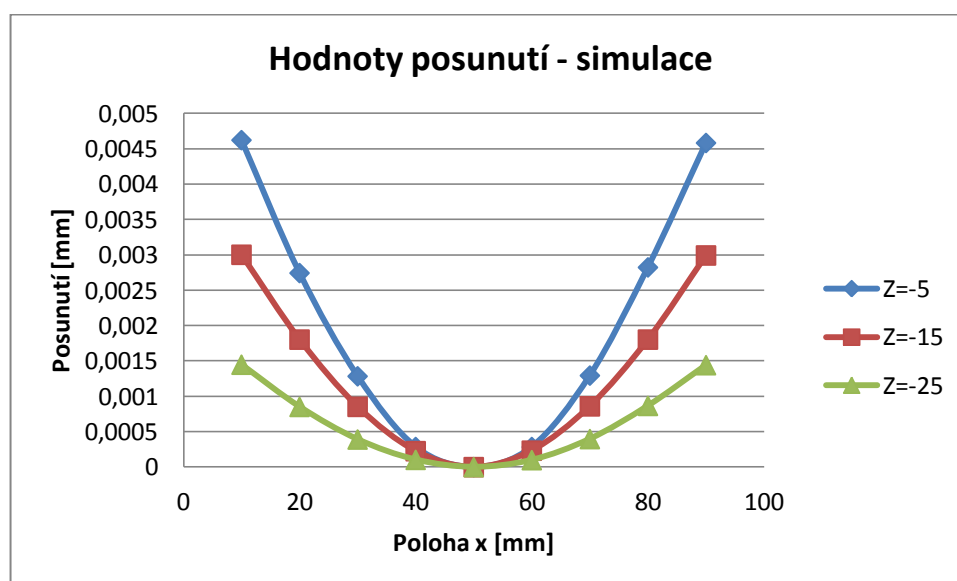


Obr. 4.18 Hodnoty vychýlení získané z pevnostní analýzy, součást Z5.

U součásti Z5 experimentálně naměřené hodnoty vychýlení nejméně odpovídají předpokládanému průběhu. U jednoho okraje dochází k výraznému nárůstu hodnot vychýlení, u druhého však nikoli. Navíc experimentální výsledky ukazují vznik většího vychýlení pro obrábění v nižší zetové hladině než ve vyšších hladinách, což je prakticky nemožné. Je tedy velmi pravděpodobné, že naměřené výsledky u součásti Z5 neodpovídají realitě. Nepřesnost byla pravděpodobně způsobena příliš velkou silou upnutí součásti, která měla za následek deformaci základny součásti. Vlivem této deformace došlo k naklonění tenké stěny součásti a ke zkreslení naměřených hodnot i k odchylce reálně odebrané radiální hloubky  $a_e$ .



Obr. 4.19 Změřené hodnoty vychýlení, součást Z10.



Obr. 4.20 Hodnoty vychýlení získané z pevnostní analýzy, součást Z10.

Experimentálně naměřené hodnoty jsou u součásti Z10 v nejvyšší hladině značně rozkmitané a nedosahují v krajních polohách výrazně vyšších hodnot než uprostřed součásti, jak by tomu podle předchozích průzkumů mělo být. Rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou vychýlení je u experimentálně naměřených hodnot 0,024 mm. U hodnot získaných simulací v programu Inventor je to 0,0046 mm. Tento rozdíl je poměrně významný.

U všech součástí a u všech měřených zetových souřadnic byly experimentální cestou naměřené hodnoty výrazně větší než hodnoty získané pomocí simulace v programu Inventor. To může být zčásti způsobeno dynamickým účinkem síly při reálném obrábění. U reálného obrábění síla působí na celé přechodové ploše obrábění. Při simulaci v programu Inventor naopak byla součást zatěžována jednotlivou statickou silou s působištem v jediném bodě. Odchylna hodnot může být způsobena také vlivem drsnosti povrchu, kdy byly pomocí měřicí sondy změřeny lokální nerovnosti na obrobené ploše,

kteřé ale neodpovídají reálnému tvaru obrobené plochy. Další možností je vznik odchylky vlivem nesprávného nastavení polohování obráběcího stroje nebo vlivem nepřesnosti při nastavení korekce nástroje. Tato chyba by se dala odstranit obrobením celé měřené plochy a provedením následných měřených průjezdů na jedno upnutí nástroje. Velký problém je také správné určení upínací síly tak, aby byla součást upnuta dostatečnou silou, ale nebyla přitom deformována. Jako vhodné řešení se v tomto směru ukázal způsob, kdy měřená součást nebyla odepnuta ze svěráku mezi obrobením na požadovaný rozměr a prováděním měřených průjezdů nástroje. Součást byla dostatečně pevně upnuta a nehrozilo deformování nebo naklopení tenkého žebra vlivem příliš velké upínací síly působící na spodní část tenkostěnné součásti. Tento postup byl použit u součástí R6 a R10.

Z hlediska statistiky by také bylo vhodné, aby měření probíhalo minimálně třikrát. Tohoto však bohužel z časového hlediska nebylo možné v rámci této práce dosáhnout.

V následující tabulce 14 jsou uvedeny maximální hodnoty jednotlivých vychýlení pro každou ze čtyř zkoumaných součástí a pro každou ze tří zetových souřadnic, které byly získány simulací v programu Inventor.

Tabulka 14 Maximální hodnoty vychýlení podle simulace

Z	R6	R10	Z5	Z10
-5	0,00687	0,00602	0,00679	0,00463
-15	0,00488	0,00405	0,00448	0,00301
-25	0,00301	0,00227	0,00263	0,00145

Dle tabulky 13, která uvádí maximální vychýlení součásti podle pevnostní analýzy, vzniká největší vychýlení u součásti se zkosením 5 mm. Zajímavé je, že u součásti se zkosením 10 mm dochází k menšímu vychýlení, než u součásti s rádiusem o stejném rozměru, a to ve všech zkoumaných zetových hladinách. Nevýhodou použití zkosení oproti rádiusu je větší množství použitého materiálu, a tedy i větší hmotnost výsledné tenkostěnné součásti. U aplikací, kde není primárním účelem snižování hmotnosti, je však úvaha o použití takového prvku pro zvýšení celkové tuhosti na místě.

## ZÁVĚR

Práce se věnuje problematice silového zatížení při obrábění tenkostěnných součástí, jeho měření a jevů vyplývajících z tohoto silového zatížení. V první části jsou teoreticky popsány síly působící při frézování, dále se práce věnuje způsobům měření silového zatížení a zařízením, která se pro měření používají. Je zde rozebrána problematika frézování tenkostěnných součástí a problémy, které vznikají při obrábění takových součástí.

V praktické části bylo navrženo a realizováno měření silového zatížení na vybraných součástech. V první části bylo měřeno silové zatížení na šesti vzorcích tvaru hranolu. Byla vyhodnocena výsledná síla působící při frézování.

Ve druhé části bylo měřeno silové zatížení na celkem čtyřech tenkostěnných součástech. Zároveň byly měřeny rozměry součásti před a po obrábění a z těchto hodnot bylo experimentálně stanoveno vychýlení součásti během obrábění. Průběhy vychýlení byly následně porovnány s hodnotami vychýlení získanými simulací pomocí modulu pevnostní analýza programu Inventor 2017. Hodnoty zatížení součásti při simulaci byly získány z naměřených hodnot silového zatížení. Po porovnání experimentálně naměřených hodnot a hodnot ze simulace bylo zjištěno:

- u všech součástí byly hodnoty experimentálně naměřené značně vyšší, než hodnoty získané simulací,
- u součástí R6 a R10 experimentálně naměřené hodnoty vychýlení respektovaly předpoklad vyšších hodnot na krajích součásti a menších uprostřed,
- u součástí Z5 a Z10 byly experimentálně změřené hodnoty rozkmitané, tyto hodnoty byly pravděpodobně zkresleny chybným upnutím součásti,
- z porovnání simulovaných hodnot vyplývá, že u součásti Z10 vzniká menší vychýlení než u součásti R10.

Přesná znalost vychýlení součásti může výrazně zjednodušit obrábění tenkostěnných součástí. Při známém průběhu vychýlení součásti je možné pohyb nástroje realizovat po křivce, díky čemuž dojde k vykompenzování nepřesnosti. Takovým způsobem lze dosáhnout snížení hmotnosti výsledné součásti, zvýšení přesnosti a v neposlední řadě časové úspory při obrábění těchto součástí.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. SANDVIK COROMANT. *Průručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
2. SLANÝ, Martin. *Studium účinků pasivních silových složek řezání na obráběný povrch*. Brno, 2013, 137 s. Dizertační práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
3. ČSN ISO 3002-4. Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení. Část 4: Sily, práca a výkon. 1994. Praha: Český normalizační institut, 1994.
4. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-2114-2374-9.
5. Měrná řezná síla. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: [https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece\\_materials/the\\_specific\\_cutting\\_force](https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/the_specific_cutting_force)
6. HUMÁR, Anton. *Technologie I - Technologie obrábění - 1.část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. 2003 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
7. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
8. PÍŠKA, Miroslav. *Machining today: from theory to applications: Obrábění dnes: od teorie k aplikacím : a thesis of a talk for the professional appointive procedure in the study field of manufactur[i]ng technology*. Brno: VUTIUUM, 2008. ISBN 978-80-214-3777-7.
9. ZOUHAR, Jan a Miroslav PÍŠKA. Napjatostně-deformační analýza moderních HSS fréz. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, **2008**(3) [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/napjatostne-deformacni-analyza-modernich-hss-frez.html>
10. DVOŘÁČEK, Jan. *Testování nástrojů pro víceosé frézování na obráběcích centrech*. Brno, 2016, 127 s. Dizertační práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně.
11. ČEP, Robert a Jan PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění*. Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2533-5.
12. SHAW, Milton Clayton. *Metal cutting principles*. New York: Oxford University Press, 1996. ISBN 0198590202.
13. BRYCHTA, Josef, Robert ČEP a Marek SADÍLEK. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Ediční středisko VŠB - TUO, 2007 [cit. 2018-02-28]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
14. KISTLER. *Test & Measurement Force and Strain* [online]. Kistler Group [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=361&model=download&callee=frontend>



15. HAVELKA, Oto. Síla bude změřena. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, **2008**(9) [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/sila-bude-zmerena.html>
16. KISTLER. *Cutting Force Measurement* [online]. Kistler Group [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.technovolt.ro/catalogue/kistler/DINAMOMETRE%20%20FIXE%20SI%20ROTATIVE.pdf>
17. ERHART, Jiří. *Základy piezoelektriny pro aplikace: Učební texty k semináři*. Brno, 2011. Dostupné také z: <https://www.yumpu.com/xx/document/view/23021671/zaklady-piezoelektriny-pro-aplikace-centrum-pro-rozvoj-vyzkumu->
18. TANG, Aijun a Liu ZHANQIANG. Deformations of thin-walled plate due to static end milling force. Elsevier [online]. 2008, **2008**(9), 7 [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360701401X#!>
19. KOVÁČ, Martin a Ivan BURANSKÝ. Experimental determination of milling model for thin-walled parts. *Acta technica corviniensis - Bulletin of Engineering* [online]. 2013, **2013**(3), 4 [cit. 2018-03-21]. ISSN 2067-3809. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/7522/4e82068a308c85695fc276a10f75ced59f59.pdf>
20. Frézování do rohu v případě tenkých a poddajných stěn. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: [https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application\\_overview/shoulder\\_milling/shoulder\\_milling\\_thin\\_walls/pages/default.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/shoulder_milling/shoulder_milling_thin_walls/pages/default.aspx)
21. POPMA, Michiel. *Computer Aided Process Planning for High-Speed Milling of Thin-Walled Parts: Strategy-Based Support*. Enschede, 2010. ISBN 978-90-365-3040-8. Dostupné také z: <https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/6081866>. PhD Thesis. Department of Engineering Technology, University of Twente.
22. POLZER, Aleš, Kateřina DUFKOVÁ a Přemysl POKORNÝ. On the modern CNC milling with a compensation of cutting tools and thin-walled workpiece deflections. *Journal of Machine Engineering* [online]. 2015, **2015**(3), 9 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: [http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-50e1d792-c2d2-4cbc-bc95-096426153d2a/c/4\\_POLZER.pdf](http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-50e1d792-c2d2-4cbc-bc95-096426153d2a/c/4_POLZER.pdf)
23. IZAMSHAH, Raja, John MO a Songlin DING. *Finite element analysis of machining thin-wall parts* [online]. , 8 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/266870747\\_Finite\\_Element\\_Analysis\\_of\\_Machining\\_Thin-Wall\\_Parts](https://www.researchgate.net/publication/266870747_Finite_Element_Analysis_of_Machining_Thin-Wall_Parts)
24. POLZER, Aleš. Deformace stopkových frézovacích nástrojů při obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, **2015**(5) [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/deformace-stopkovych-frezovacich-nastroju-pri-obrabeni.html>
25. OUWERKERK, G. van. *Removal feature determination: For use in CAPP for high-speed milling of thin-walled products*. Enschede, 2003. M.Sc. Thesis. University of Twente.
26. TLUSTY, J., S. SMITH a W.R. WINFOUGH. Techniques for the Use of Long Slender End Mills in High-speed Milling. *CIRP Annals* [online]. 1996, **45**(1), 393-

- 396 [cit. 2018-04-23]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63088-1. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607630881>
27. MICHALIK, Peter, Jozef ZAJAC, Michal HATALA, Dusan MITAL a Veronika FECOVA. Monitoring surface roughness of thin-walled components from steel C45 machining down and up milling. *Measurement* [online]. 2014, **58**, 416-428 [cit. 2018-04-23]. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.09.008. ISSN 02632241. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224114003881>
28. SECO SECO. *Solid solutions for challenging applications: ISO-S Material Guide*. 2015. Dostupné také z: [https://issuu.com/secotools/docs/hq\\_bro\\_iso-s\\_material\\_guide\\_lr\\_sp](https://issuu.com/secotools/docs/hq_bro_iso-s_material_guide_lr_sp)
29. PÍŠKA, Miroslav, Jan ZOUHAR a Aleš POLZER. On the precise shoulder milling with an optimised 4-axis CNC machining. In: *Moderní výrobní technologie pro 21. století: Odborná konference při příležitosti 110. výročí založení VUT v Brně*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, s. 4. ISBN 978-80-214-3914-6.
30. Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, **2002**(4) [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolestenym-povrchem.html>
31. Použití slitiny. *Alumeco* [online]. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://www.alumeco.cz/technick%C3%A9-informace/%C3%BA-daje-o-hlin%C3%ADku/pou%C5%BE-it%C3%AD-slitiny?s=0>
32. Hliník/slitiny hliníku. *Nevyko* [online]. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://www.nevyko.cz/hlinik/>
33. ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků: Část 3: Chemické složení*. Panenské Břežany: Český normalizační institut, 2004.
34. Hliník. *ALMS* [online]. [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <http://www.alms-brno.cz/produkty/1-hlinik/>
35. Tenkovrstvé piezoelektrické senzory. In: *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: [https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/14\\_senzory\\_QCM.pdf?redirected](https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/14_senzory_QCM.pdf?redirected)
36. Gantry-type Machining Centre MCV 1210. *TAJMAC-ZPS* [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.tajmac-zps.cz/en/MCV-1210>
37. *TAJMAC-ZPS. Návod k používání pro vertikální obráběcí centrum MCV 1210*. 2007.
38. RENISHAW. *OMP400 high-accuracy machine probe* [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/omp400-high-accuracy-machine-probe--6089>
39. YUSOFF, Ahmad R. a Neil D. SIMS. Optimisation of variable helix tool geometry for regenerative chatter mitigation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2011, **51**(2), 133-141 [cit. 2018-05-17]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.10.004. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695510001860>

40. JS413120D3SZ3.0. *SECO Tools* [online]. SECO [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: [https://www.secotools.com/#article/p\\_02881818?pf=true](https://www.secotools.com/#article/p_02881818?pf=true)
41. ECA-H3-CF-C. *ISCAR* [online]. ©2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnum=3605&mapp=Is&app=0&GFSTYP=M>
42. VHM Seco Jabro Alu Fräser. *VHM Fräser und HSS-E Fräser Shop* [online]. Henstedt-Ulzburg: Hans Treiber, ©2011 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.fraeser-shop.de/vhm-seco-jabro-alu-fraeser-zox-16-radius-1-mm-js453160e2r100-0z3-hemi.html>
43. *Kistler* [online]. Praha: Kistler Eastern Europe, ©2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/>
44. *ROZVOJ INFORMAČNÍCH A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ PODPORUJÍCÍCH AKREDITOVANÉ STUDIJNÍ PROGRAMY A ŘÍZENÍ VYSOKÉ ŠKOLY: Dílčí zpráva k projektu č. 456.* Brno. Dostupné také z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/rozvoj/Vybaveni\\_CNC\\_KISTLER\\_JC.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/rozvoj/Vybaveni_CNC_KISTLER_JC.pdf)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
$A_D$	$[mm^2]$	Průřez třísky
$A_{Di}$	$[mm^2]$	Jmenovitý průřez třísky
$D$	$[mm]$	Průměr nástroje
$D_c$	$[mm]$	Průměr řezné části nástroje
$D_s$	$[mm]$	Průměr stopky nástroje
$E$	$[Pa]$	Youngův modul pružnosti v tahu
$F_c$	$[N]$	Tangenciální složka řezné síly
$F_{cN}$	$[N]$	Normální složka řezné síly
$F_f$	$[N]$	Posuvová složka řezné síly
$F_n$	$[N]$	Normálová síla
$F_p$	$[N]$	Pasivní složka řezné síly
$F_r$	$[N]$	Síla působící na nástroj v radiálním směru
$F_x$	$[N]$	Síla působící ve směru osy x
$F_y$	$[N]$	Síla působící ve směru osy y
$F_z$	$[N]$	Síla působící ve směru osy z
$F_{Xm}$	$[N]$	Složka řezné síly ve směru osy x, souřadného systému stroje
$F_{Ym}$	$[N]$	Složka řezné síly ve směru osy y, souřadného systému stroje
$F_{Zm}$	$[N]$	Složka řezné síly ve směru osy z, souřadného systému stroje
$F_{Xw}$	$[N]$	Složka řezné síly ve směru osy x, souřadného systému obrobku
$F_{Yw}$	$[N]$	Složka řezné síly ve směru osy y, souřadného systému obrobku
$F_{Zw}$	$[N]$	Složka řezné síly ve směru osy z, souřadného systému obrobku
$G$	$[Pa]$	Modul pružnosti ve smyku
$I$	$[mm^4]$	Kvadratický moment průřezu
$I_1$	$[mm^4]$	Kvadratický moment průřezu řezné části frézy
$I_2$	$[mm^4]$	Kvadratický moment průřezu válcové části frézy
$I_p$	$[mm^4]$	Polární moment průřezu
$I_y$	$[mm^4]$	Kvadratický moment průřezu
$L$	$[mm]$	Délka vetknutého nosníku

$L_1$	[mm]	Délka řezné části nástroje
$L_2$	[mm]	Délka části nástroje s válcovým průřezem
$M_k$	[Nm]	Točivý moment vřetene
$M_{kb}$	[Nm]	Brzdňý točivý moment
$M_y$	[Nm]	Ohybový moment
$P_c$	[W]	Výkon obráběcího stroje na prázdkno
$P_o$	[W]	Výkon obráběcího stroje při obrábění
$P_{už}$	[W]	Užitečný výkon
$Q_x$	[C]	Náboj
$R$	[mm]	Poloměr nástroje
$T_z$	[N]	Posouvající síla
$W$	[J]	Energie napjatosti
$a_e$	[mm]	Radiální hloubka záběru ostří
$a_p$	[mm]	Axiální hloubka záběru ostří
$a_{pmax}$	[mm]	Maximální axiální hloubka řezu
$b$	[mm]	Šířka stěny součásti
$b_i$	[mm]	Jmenovitá šířka třísky
$b_s$	[mm]	Výška stěny tenkostěnné součásti
$c_0$	[-]	Konstanta
$d_{11}$	[C·N <sup>-1</sup> ]	Piezoelektrický koeficient
$h$	[mm]	Tloušťka stěny součásti
$h_i$	[mm]	Jmenovitá tloušťka třísky
$h_m$	mm	Tloušťka třísky
$h_s$	[mm]	Tloušťka stěny tenkostěnné součásti
$k_c$	[Pa]	Měrná řezná síla
$k_{c1}$	[]	Měrná řezná síla pro tloušťku třísky 1mm a úhel čela nástroje $\gamma_o = 0^\circ$
$m_c$	[-]	Exponent závislý na fyzikální vlastnosti a řezné podmínky
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky vřetene
$n_d$	[-]	Počet disků
$s_s$	[°]	Úhel stoupání šroubovice

$v_c$	$[m \cdot min^{-1}]$	Řezná rychlost
$v_f$	$[mm \cdot min^{-1}]$	Posuvová rychlost
$w_F$	$[mm]$	Průhyb nástroje
$x$	$[mm]$	Vzdálenost působíště síly
$z$	$[-]$	Počet zubů nástroje
$z_z$	$[-]$	Počet zubů nástroje
$\gamma$	$[^\circ]$	Radiální úhel čela
$\gamma_o$	$[^\circ]$	Úhel čela nástroje, měřený v ortogonální rovině
$\varphi_i$	$[^\circ]$	Úhel posuvového pohybu
$\kappa_r$	$[^\circ]$	Úhel nastavení hlavního ostří
$\lambda$	$[^\circ]$	Úhel stoupání šroubovice

Zkratka	Popis
<b>SK</b>	slinutý karbid
<b>CNC</b>	Computer Numerical Control
<b>PZT</b>	Piezoelektrická keramika
<b>NC</b>	Numerical Control
<b>MKP</b>	Metoda konečných prvků
<b>WC</b>	Karbid wolframu

**SEZNAM PŘÍLOH**